



Integrita povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jan Šindelář**
Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.





Surface integrity after turning of austenitic and duplex steels

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering

Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials

Author: **Bc. Jan Šindelář**

Supervisor: Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.





Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program: strojírenská technologie

Zaměření: obrábění a montáž

Integrita povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí

Surface integrity after turning of austenitic and duplex

KOM - 1280

Bc. Jan Šindelář

Vedoucí práce:

Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Katedra obrábění a montáže - TUL

Konzultant:

prof. Ing. Nikolaj Ganev, CSc.

Katedra obrábění a montáže - TUL

Počet stran: 95

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 55

Počet tabulek: 17

Počet grafů: 13

Datum: 27. 5. 2016



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Šindelář**

Osobní číslo: **S14000303**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**

Název tématu: **Integrita povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí**

Zadávací katedra: **Katedra obrábění a montáže**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Shrnutí poznatků o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu. Shrnutí poznatků o austenitických a duplexních ocelích.
2. Rozbor experimentálních metod a materiálových zkoušek při studiu nově vzniklého povrchu a jejich fyzikální principy.
3. Návrh metodiky experimentů v rámci zkoumání integrity povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí.
4. Realizace experimentů (difrakční měření a magnetoelastická analýza Barkhausenova šumu).
5. Hodnocení integrity povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací: **Obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby.**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 60 - 70 stran textu.**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. **KOCMAN, K., PROKOP, K.** *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. **BILÍK, O.** *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. **KRAUS, I., GANEV, N.** *Technické aplikace difrakční analýzy*. ČVUT 2004. 171 str. ISBN 80-01-03099-7.
4. **VIGNER, M., PŘIKRYL, Z. a kol.** *Obrábění*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1984. 808 s. ISBN -.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.**
Katedra obrábění a montáže
Konzultant diplomové práce: **prof. Ing. Nikolaj Ganev, CSc.**
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání diplomové práce: **2. března 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. srpna 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2016

**INTEGRITA POVRCHU PO SOUSTRUŽENÍ AUSTENITICKÝCH A
DUPLEXNÍCH OCELÍ****ANOTACE:**

Předložená diplomová práce zpracována na téma „Integrita povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí“ přispívá k rozšíření poznatků o obrábění zmíněných nerezových ocelí.

V teoretické části byl proveden rozbor dané problematiky. Hlavní pozornost byla věnována poznatkům o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu, shrnutí poznatků o nerezových ocelích, základním informacím o integritě povrchu a teoretickým základům použitých metod.

Experimentální část v úvodu popisuje použité materiály, stroje, nástroje, měřicí zařízení a pomůcky, dále řezné podmínky, metodiku experimentů a měření a končí vyhodnocením výsledků.

**SURFACE INTEGRITY AFTER TURNING OF AUSTENITIC
AND DUPLEX STEELS****ANNOTATION:**

This diploma thesis elaborated on the theme "Surface integrity after turning austenitic and duplex steels" contributes to the expansion of knowledge about these machining stainless steels.

The theoretical part was an analysis of the issue. The main attention was paid to the knowledge about the impact of working conditions on a turning surface integrity, summary of findings on stainless steels, basic information about the integrity of the surface and the theoretical foundations of the methods used.

Experimental part in the introduction describes the materials, machines, tools, test equipment and tools, as well as cutting conditions, the methodology experiments and measurements and ends with an evaluation of the results.

Klíčová slova: SOUSTRUŽENÍ, ÚHEL ČELA, AUSTENITICKÁ A DUPLEXNÍ
OCEL, INTEGRITA POVRCHU

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2016

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 95

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 55

Počet tabulek: 17

Počet grafů: 13





Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 27. května 2016

Podpis:





PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce paní **Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D.** za velmi věcné konzultace, důležité rady a její ochotu při tvorbě práce.

Dále děkuji konzultantovi této diplomové práce panu **prof. Ing. Nikolaji Ganevovi, CSc.** za odborné rady.

Nemohu zapomenout poděkovat také panu **Ing. Kamilovi Kolaříkovi, Ph.D.** a panu **Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi** za poskytnutou pomoc při experimentech a měřeních. Neposlední poděkování si zaslouží kolektiv laboratoře strukturní rentgenografie na ČVUT v Praze.

Také bych chtěl poděkovat celé své rodině a přátelům za podporu a trpělivost projevenou v průběhu mého studia vysoké školy.

Bc. Jan Šindelář



Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	11
1. Úvod.....	14
2. Teoretická část.....	15
2.1 Poznatky o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu	15
2.2 Shrnutí poznatků o nerezových ocelích	17
2.2.1 Charakteristika nerezových ocelí.....	17
2.2.2 Magnetismus nerezových ocelí	18
2.2.3 Popis působení legujících prvků	18
2.2.4 Obrábění nerezových ocelí.....	19
2.2.5 Druhy nerezových ocelí	19
2.2.5.1 Feritické oceli.....	19
2.2.5.2 Martenzitické oceli	20
2.2.5.3 Austenitické oceli	21
2.2.5.4 Duplexní (austeniticko - feritické) oceli.....	22
2.3 Integrita povrchu	23
2.3.1 Základní specifikace integrity povrchu.....	23
2.3.2 Nejčastěji analyzované parametry integrity povrchu.....	24
2.3.2.1 Mikrogeometrie povrchu	24
2.3.2.2 Stupeň a hloubka zpevnění	24
2.3.2.3 Strukturní fázové změny	26
2.3.2.4 Smysl, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí.....	27
2.4 Teoretické základy použitých metod	29
2.4.1 Mikrogeometrie povrchu - drsnost povrchu a jeho profil	29
2.4.2 Zkouška mikrotvrdosti.....	30
2.4.3 Pozorování struktury.....	31
2.4.4 Metody pro měření zbytkových napětí.....	32
2.4.4.1 Rentgenografická metoda $\sin^2\psi$ pro určení zbytkových napětí...33	
2.4.4.2 Analýza Barkhausenova šumu.....	35
3. Experimentální část	38
3.1 Zkušební vzorky	38
3.1.1 Specifikace materiálu AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel.....38	
3.1.2 Specifikace materiálu AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel.....39	
3.2 Popis strojů a pomůcek pro experimenty	40
3.2.1 Obráběcí stroj.....	40

3.2.2	Nástroj	41
3.2.2.1	Držák vyměnitelných břitových destiček	41
3.2.2.2	Vyměnitelné břitové destičky.....	42
3.2.3	Manuální stolní metalografická rozbrušovací pila	45
3.2.4	Profiloměr	46
3.2.5	Metalografický lis	47
3.2.6	Mechanický preparační systém	48
3.2.7	Mikrotvrdoměr.....	49
3.2.8	Elektrolytická leštička	49
3.2.9	Leptadlo BERAHA I	50
3.2.10	Metalografický světelný mikroskop.....	50
3.2.11	Elektrolytická leštička Struers.....	50
3.2.12	Číselníkový úchylkoměr	51
3.2.13	Difraktometr.....	51
3.2.14	Magnetoelastický analyzátor	52
3.3	Řezné podmínky	53
3.4	Metodika experimentu.....	54
3.5	Metodika měření	56
3.5.1	Měření drsnosti.....	59
3.5.2	Měření tvrdosti.....	60
3.5.3	Zkoumání struktury.....	62
3.5.4	Stanovení makroskopických zbytkových napětí	64
3.5.5	Stanovení gradientů makroskopických zbytkových napětí	66
3.5.6	Měření magnetoleastického parametru	67
3.6	Vyhodnocení výsledků	68
3.6.1	Drsnost	68
3.6.2	Stupeň a hloubka zpevnění	70
3.6.3	Struktura povrchu	74
3.6.4	Makroskopická zbytková napětí v povrchové vrstvě.....	78
3.6.5	Gradient makroskopických zbytkových napětí.....	80
3.6.6	Měření magnetoelastického parametru	83
4.	Diskuze výsledků	87
5.	Závěr.....	90
	Použitá literatura	91
	Seznam příloh	95

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka, symbol	Jednotka	Popis
A		axiální směr
a	[mm]	tloušťka odebírané vrstvy materiálu
a ₁	[mm]	tloušťka třísky
A _{min}	[%]	tažnost
a _p	[mm]	hloubka řezu
As		arsen
b	[mm]	šířka těla soustružnického nože
Br	[T]	remanentní (zbytková) magnetizace
C		uhlík
Cr		chrom
Cu		měď
d	[nm]	mezirovinná vzdálenost
d ₀	[nm]	mezirovinná vzdálenost odpovídající nenap. stavu
d _i	[mm]	výška VBD
d _v	[mm]	úhlopříčka vtisku
DOE		metoda plánovaných experimentů
E	[MPa]	Youngův modul
f	[mm]	výška hlavy soustružnického nože
F	[F]	síla
f _{ot}	[mm/ot]	posuv na otáčku
h	[mm]	výška těla soustružnického nože
H		vodík
H _c	[A/m]	koercitivní síla magnetického pole
HCl		kyselina chlorovodíková
H _{cm}	[A/m]	maximální koercitivní síla magnetického pole
I	[-]	intenzita difraktovaného svazku rtg. záření
I ₀	[-]	intenzita dopadajícího svazku rtg. záření
IT		třída přesnosti
k	[-]	koeficient přechování

$K_2S_2O_5$		disiřičitan draselný
KV	[J]	vrubová houževnatost
l	[mm]	šířka VBD
l_1	[mm]	délka soustružnického nože
l_2	[mm]	délka hlavy soustružnického nože
Mn		mangan
Mo		molybden
mp	[mV]	magnetoelastický parametr
M_s	[°C]	martenzit start
n	[-]	řád reflexe
N		dusík
Nb		niob
NH_4FHF		hydrogendifluorid amonný
Ni		nikl
P		fosfor
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
R_{mr}	[%]	materiálový nosný podíl profilu
$R_{p0,2}$	[MPa]	mez kluzu v tahu
$R_{p1,0}$	[MPa]	mez
R_t	[μm]	celková výška profilu drsnosti
R_{Sm}	[μm]	průměrná šířka prvků profilu
R_z	[μm]	maximální úchylka profilu
$R_z (10)$	[μm]	výška nerovnosti profilu z deseti bodů
r_ϵ	[mm]	poloměr zaoblení špičky
s	[mm]	tloušťka VBD
S		síra
s_1	[1/MPa]	rentgenografická elastická konstanta
s_2	[1/MPa]	rentgenografická elastická konstanta
Sb		antimon
Si		křemík
Sn		cín
T		tangenciální směr
T_{ef}	[μm]	efektivní tloušťka vnikání záření

Ti		titan
VBD		vyměnitelná břitová destička
v_c	[m/min]	řezná rychlost
WEDM		elektroerozivní drátové řezání
α_0	[°]	úhel hřbetu v ortogonální rovině
β_0	[°]	úhel břitu v ortogonální rovině
β_1	[°]	smyková rovina
γ_0	[°]	úhel čela v ortogonální rovině
Δd_{hkl}	[nm]	změna mezirovinné vzdálenosti
ε	[-]	poměrná deformace
θ	[°]	difrakční úhel
θ_0	[°]	difrakční úhel v nenapjatém stavu materiálu
λ	[nm]	vlnová délka použitého záření
λ_0	[°]	úhel sklonu ostří
ν	[-]	Poissonovo číslo (konstanta)
σ_φ	[MPa]	složka napětí
φ	[°]	směr napětí σ vzhledem k ose
ψ	[°]	úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami

1. Úvod

Jednou z nejvyžívanějších metod strojního obrábění je soustružení [1]. Touto metodou se vyrábí až 40% rotačních součástí. U většiny součástí je v současné době cílem snížit jejich hmotnost na minimum a životnost na maximum při zachování průběhu zatížení. Z toho vyplývá, že jejich mechanické a chemické vlastnosti musí být co nejlepší. S tím souvisí použití nových materiálů a jejich různé chování při obrábění.

Předkládaná diplomová práce poskytuje nové informace o možnostech soustružení nerezových ocelí.

Hlavním cílem práce byl výběr nejvhodnějšího úhlu sklonu čela nástroje pro obrábění austenitické a duplexní nerezové oceli.

K dosažení cíle byly zvoleny jednotné řezné podmínky, aby se posoudil pouze vliv úhlu čela na soustružený povrch. Obrobený povrch se poté podrobil měření drsnosti povrchu R_a , R_z , stupně a hloubky zpevnění, zkoumání struktury povrchu a podpovrchových vrstev, stanovení makroskopického zbytkového napětí v povrchu a gradientu makroskopických zbytkových napětí a měření magnetoelastického parametru Barkhausenova šumu.

Diplomová práce je členěna do tří základních částí (teoretické, experimentální a závěrečné). Teoretická část práce, která se opírá o odbornou literaturu, obsahuje poznatky o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu, shrnutí poznatků o nerezových ocelích, základní informace o integritě povrchu a teoretické základy použitých metod. Experimentální část v úvodu popisuje použité materiály, stroje, nástroje, měřicí zařízení a pomůcky, dále řezné podmínky, metodiku experimentů a měření a končí vyhodnocením výsledků. Závěrečná část je tvořena dosaženými výsledky výzkumu a diskuzí k celkovému výsledku diplomové práce.

2. Teoretická část

Teoretická část diplomové práce se opírá o odbornou literaturu a normy. Postupně jsou uvedeny poznatky o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu [1, 2, 3], poznatky o nerezových ocelích [4, 8], integrity povrchu [9, 11, 12, 13, 14, 16, 17] a nakonec teoretické základy použitých metod [19, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

2.1 Poznatky o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu

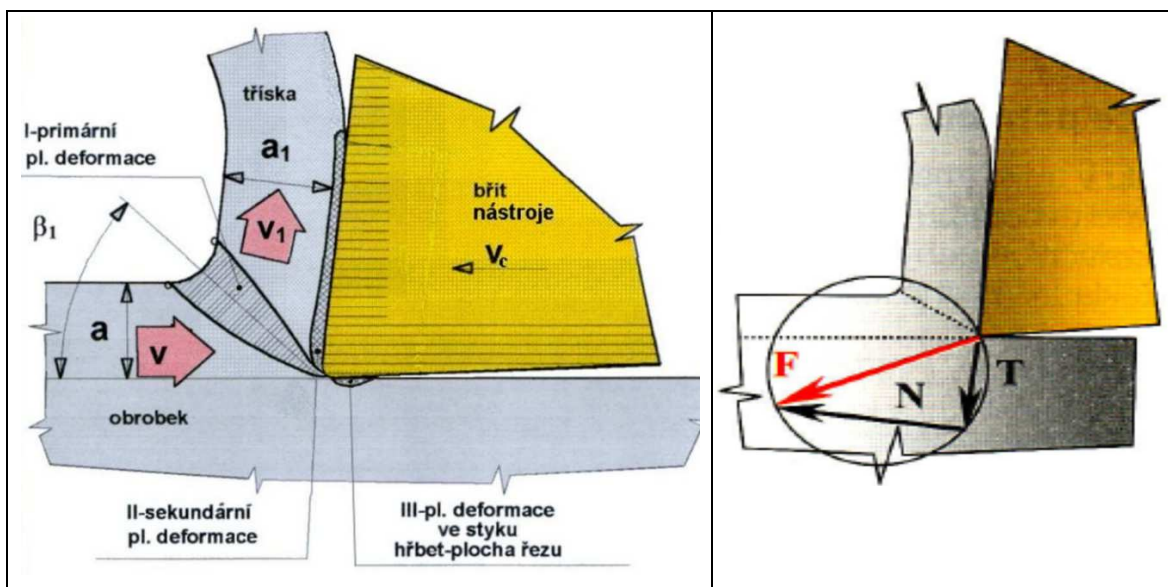
Řezné podmínky volíme podle druhu práce, požadované rozměrové přesnosti a jakosti obrobené plochy [1]. Dále musíme brát při volbě řezných podmínek v úvahu ekonomická hlediska, hlavně hospodárnou trvanlivost nástroje.

V zásadě můžeme pro soustružení uvést následující hodnoty rozměrové a tvarové přesnosti:

- Běžná rozměrová přesnost dosahovaná při soustružení se pohybuje:
 - u hrubování v rozmezí 0,2 - 0,4 mm,
 - při obrábění na čisto 0,1 - 0,2 mm.
- Hodnoty přesnosti tvaru jsou u:
 - kuželovitosti 0,01 až 0,02 mm na délce 300 mm,
 - oválnosti 0,005 až 0,01 mm.

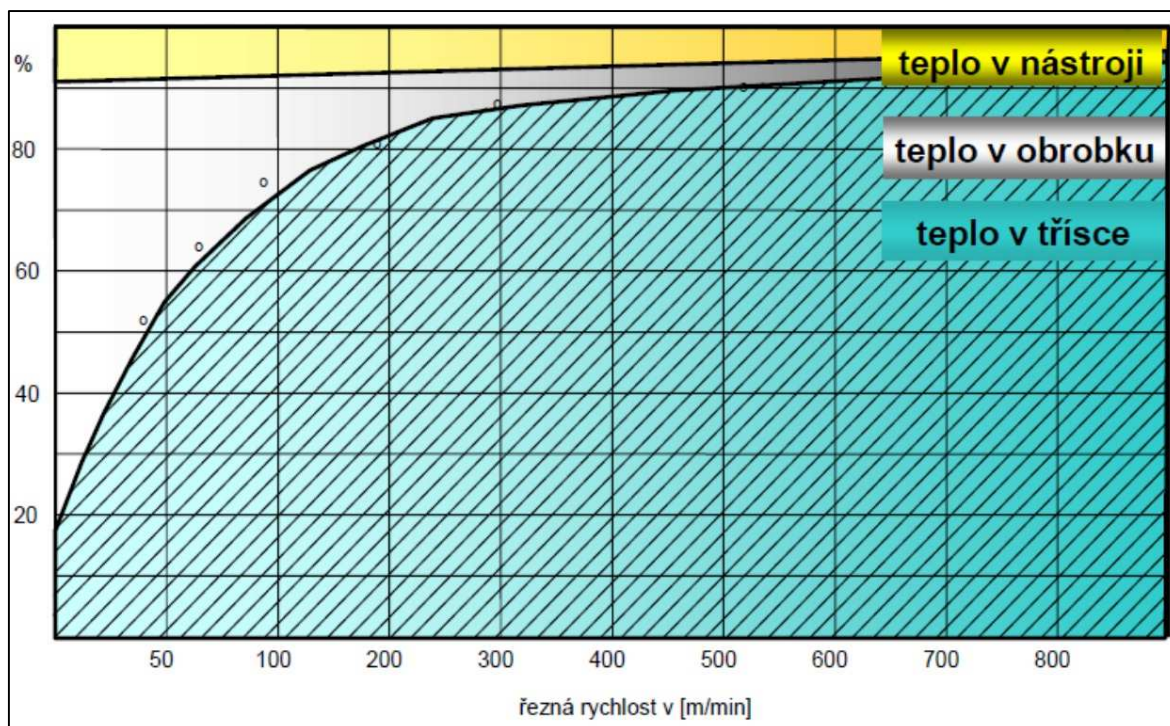
Drsnost obrobené plochy vyplývá z posuvu a poloměru špičky nože. Při posuvu $f_{ot} = 0,1$ mm/ot a poloměru zaoblení špičky $r_\epsilon = 0,5$ mm dosahuje průměrné hodnoty $Ra = 1,6$ μ m. Uvedené hodnoty jsou pouze orientační a závislé na mnoha podmínkách, např. na přesnosti obráběcího stroje.

Při obrábění kovů konvenčním způsobem (relativně nízká teplota + chlazení oproti například vysokorychlostnímu obrábění), prochází odřezávaný materiál obrobku oblastí vzniku třísky a výrazně se při tom plasticky deformuje [2]. To je příčina zpevnění materiálu vznikající třísky oproti původnímu materiálu obrobku. Takto zpevněná tříska může mít i dvakrát vyšší tvrdost. Při nízké řezné rychlosti v_c vzniká malý úhel smykové roviny β_1 , a materiál třísky se výrazně pěčuje [3]. Koeficient pěchování $k = a_1/a$ je výrazně větší než 1 (obr. 1). Čím větší hodnota k , tím více je tříska plast. deformována (pěchována) a to je důsledek větší řezné síly.



Obr. 1 Místo řezu při konvenčním obrábění [3] Obr. 2 Rozklad řezné síly [3]

Tříška rovněž klade větší odpor proti ohybu v důsledku malého úhlu smykové roviny. Tím se zvětšuje délka kontaktní plochy mezi třískou a břitem nástroje. Smykové napětí v oblasti sekundárních plastických deformací přesahuje mez pevnosti ve smyku již zpevněného materiálu třísky a dochází tak k další výrazné plastické deformaci [2]. Velké síly (obr. 2) mají za následek vznik intenzivního tření a vývin tepla (obr. 3). Vzniklé teplo má relativně dost času (nízká v_c) přejít do břitu nástroje. Se zvyšující se řeznou rychlostí (deformační rychlostí), úměrně roste množství vznikajícího procesního tepla, které je závislé i na řezném odporu (měrné řezné síle). Řezný odpor pak závisí především na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, proto tvrdé, zušlechtěné materiály s velkou pevností jsou těžko obrobitelné (trvanlivost břitu nástroje). Při konvenčním obrábění běžných druhů ocelí je proto charakteristická větší oblast primárních plastických deformací, která často zasahuje i do oblasti pod rovinu řezu. Při obrábění zušlechtěných ocelí se deformace zasahující pod rovinu řezu (v důsledku zvětšování úhlu β_1 a zmenšování oblasti primárních plastických deformací) zmenšuje. V oblasti terciálních plastických deformací je tomu naopak. Velké řezné síly a odpor materiálu proti deformaci způsobují velké zatížení břitu, zvláště hřbetu.



Obr. 3 Rozdělení odváděného tepla v závislosti na v_c při obrábění oceli [3]

2.2 Shrnutí poznatků o nerezových ocelích

2.2.1 Charakteristika nerezových ocelí

Nerezové oceli patří do skupiny železných materiálů se zvláštními vlastnostmi [4]. Dle ČSN jsou zařazeny do třídy 17. Podle svých vlastností se dělí na korozivzdorné, žáruvzdorné a žáropevné. Tyto vlastnosti ovlivňuje poměr legujících prvků.

Korozivzdorná (nerezová) ocel je vysoce legovaná ocel se zvýšenou odolností vůči chemické i elektrochemické korozi [5]. Korozní odolnost je založena na schopnosti tzv. pasivace povrchu železa. Pasivovaná vrstva tedy dává korozivzdorným ocelím dobrou odolnost proti všeobecné korozi. Za určitých podmínek může být pasivita místně porušena a dochází ke vzniku lokálních forem koroze.

Korozivzdorné oceli lze přesněji rozdělit podle chemického složení a struktury do těchto základních skupin:

- feritické oceli,
- martenzitické oceli,
- austenitické oceli,
- austeniticko-feritické, martenziticko-austenitické a poloferitické oceli.

2.2.2 Magnetismus nerezových ocelí

Nerezové austenitické oceli jsou nemagnetické [6]. Po jejich tváření za studena však mohou vykazovat určitý slabý magnetismus, který je výraznější ve vytvarovaných rozích, na opracovaných plochách nebo v okolí vyvrtaných děr. Tento slabý magnetismus je způsoben vznikem martenzitu. Na celkovém výrobku z nerezové austenitické oceli se může tedy vyskytovat nerovnoměrný slabý magnetismus.

Nerezové feritické, martenzitické i duplexní oceli jsou magnetické.

2.2.3 Popis působení legujících prvků

V tabulce 1 jsou shrnuty základní legující prvky a jejich vliv na chování oceli, ve které jsou obsaženy.

Tab. 1 Vliv jednotlivých legujících prvků na vlastnosti oceli

C	Uhlík je nejdůležitější a nejvlivnější legující prvek v oceli [7]. Se stoupajícím obsahem C se zvyšuje pevnost a kalitelnost. Avšak s vyšším obsahem C se snižuje tažnost při přetržení, kujnost, svařitelnost a řezná obrobiteľnost.
Cr	Chrom je silný tvůrce karbidů a zvyšuje proto tvrdost a pevnost, při jen nepatrném snížení tažnosti. Při obsahu více než 12% Cr je ocel odolná vůči korozi.
Ni	Nikl zvyšuje pevnost při jen nízkých ztrátách houževnatosti a způsobuje navíc dobrou prokalitelnost. CrNi oceli jsou odolné vůči korozi a proti okujení a také žárovevné. Ni neovlivňuje negativně svařitelnost a zlepšuje zejména při nízkých teplotách houževnatost.
Mo	Molybden zvyšuje jako tvůrce karbidů pevnost v tahu. Také mez průtažnosti leží u molybden obsahujících ocelí často o něco výše. Mo se příznivě projevuje na svařitelnosti. Prostřednictvím Mo se zvyšuje odpor vůči důlkové korozi a odolnost vůči kyselinám.

Pokračování tab. 1

Ti	Titan vede jako silný karbidy tvořící prvek k pásování uhlíku a je proto v austenitických ocelích používán ke stabilizaci vůči mezikrystalové korozi. Oceli jsou proto také po svařování i bez dodatečné tepelné úpravy odolné i při silných rozměrech.
Cu	Měď zvyšuje pevnost při snížení tažných vlastností. Při nízkém obsahu zlepšuje odpor vůči korozi za atmosférických vlivů.
N	Obsah dusíku zvýhodňuje charakteristické hodnoty pevnosti při pokojové teplotě.
S	Síra zvyšuje mazací účinek při obrábění.

2.2.4 Obrábění nerezových ocelí

Vlastnosti nerezových ocelí

- Vyšší adheze materiálu - následkem zvýšené adheze dochází během procesu obrábění k nárůstu na břitu, což ovlivňuje řezný proces více než při obrábění běžných ocelí (správné nastavení řezné rychlosti je zde prvořadé) [8].
- Utvářené třísky jsou nepravidelného tvaru - kontrola dlouhých třísek je obtížná.
- Vyšší tendence k deformačnímu zpevnění - po počátečním řezu se utvoří na povrchu obrobku tvrdá vrstva, tuto vrstvu pak o to obtížněji odstraňují řezy následující (snížená životnost nástroje).
- Nízká tepelná vodivost - teplo vytvořené během procesu obrábění je zapotřebí odvést třískami, to však u nerezových ocelí není tak snadné. Výsledkem je větší koncentrace tepla (vyšší teplota v oblasti řezu).

2.2.5 Druhy nerezových ocelí

2.2.5.1 Feritické oceli

Feritické oceli obsahují 13 - 30% Cr a obsah C je zpravidla pod 0,1% [5]. Nejsou kalitelné a jejich pevnost je vyšší než u nelegované uhlíkaté oceli. Nedoporučuje se použití nad 320 °C. Při teplotním působení od cca 350 do 500 °C

(například při svařování) dochází ke snížení houževnatosti a tažnosti materiálu. Při teplotách okolo 900 °C materiál křehne, což je obecně podstatnou nevýhodou feritických ocelí. Jsou svařitelné, ale v oblasti sváru materiál křehne. Jsou tvárné, ohýbatelné a mimo jakostí stabilizovaných *Ti* jsou i dobře leštitelné. Obrobitelnost většiny jakostí je horší a je třeba počítat s tvorbou nárůstků a s horším odvodem třísek. Pro obrábění se používá jakost AISI 430F (1.4104) - automatová, která je za účelem obrobitelnosti legovaná *S*, ale díky obsahu *S* se snižuje odolnost proti korozi a tažnost. Jakost AISI 430F není vhodná ke svařování a k tváření za studena.

Feritické oceli se používají v potravinářském průmyslu ve slabých korozních prostředích (suché potraviny, zelenina, ovoce, nápoje) s požadavkem na svařování. Používají se pro výrobu velkokuchyňského nábytku a pro výrobu vybavení gastro provozů. Další použití nacházejí v automobilovém průmyslu, při výrobě kuchyňských potřeb a sanitárního zařízení, ve vzduchotechnice, architektuře, v interiérech a stavebnictví. Své místo najdou i v určitých odvětvích chemického průmyslu.

2.2.5.2 Martenzitické oceli

Martenzitické oceli obsahují od 12 do 18% *Cr* a až 1,5% *C* [5]. Jejich pevnost lze podstatně zvýšit kalením. Materiál je po kalení křehký a obvykle následuje popouštění. Mezi tyto jakosti patří jakosti AISI 420 (1.4028), EN 1.4021, EN 1.4034. Korozní odolnost všech typů martenzitických ocelí je nejvyšší u kvalitního, nejlépe leštěného povrchu. Nebezpečím při použití všech typů martenzitických ocelí je křehnutí. Křehnutí může vznikat po ohřevu na teplotu 350 - 550 °C, a proto je nutné se tomuto rozmezí při tepelném zpracování vyhnout. Nebezpečí je i křehnutí způsobené *H*, které může vznikat po moření. Pokud není požadována houževnatost nebo tažnost (například u chirurgických nástrojů, holících čepelí atd.) lze kalením a popouštěním dosáhnout pevnosti v tahu až 2000 MPa. Většina jakostí martenzitických ocelí není svařitelná.

Martenzitické oceli s dobrými mechanickými vlastnostmi a s poměrně vysokou korozní odolností jsou oceli s obsahem *C* do 0,15% a při obsahu *Cr* od 11,5 do 13,5%. Pro nožířské účely jsou používány oceli s obsahem *C* od 0,2 do 0,4% a *Cr* a od 12 do 14,5%, které si zachovávají dobrou úroveň tažnosti a zároveň i tvrdosti. Oceli s obsahem *C* od 0,5 do 1,5% a *Cr* od 16 do 18% sice

dosahují výrazně vyšší tvrdosti, ale mají nižší korozivzdornost. Lepších mechanických vlastností a zlepšení svařitelnosti při zachování vysoké pevnosti se dosahuje legováním *Ni* a *Mo*.

Martenzitické oceli se používají na výrobu nožů, chirurgických nástrojů, součástí čerpadel, pro lopatky parních turbín, v chemickém, potravinářském a energetickém průmyslu pro otěruvzdorné součásti pracující v agresivním prostředí.

2.2.5.3 Austenitické oceli

Austenitické oceli mají široké spektrum použití a jejich volba bývá nejlepším kompromisem pro další zpracování s využitím jejich mechanických vlastností a odolnosti proti korozi [5], [6]. Obvykle obsahují méně než 0,1% *C*, 16 - 22% *Cr*, 8 - 40% *Ni*, 0 - 5% *Mo*, případně *N*, *Ti*, *Nb*, *Cu* nebo *Si*. Austenitické se nazývají podle austenitické struktury, kterou dosahují za normální teploty i za teploty pod bodem mrazu. Mají nízkou mez kluzu 230 - 300 MPa, ale vysokou houževnatost. Tažnost mívají mezi 45 - 65%, díky které jsou vhodné ke tváření za studena, při kterém lze dosáhnout meze kluzu 510 - 960 MPa avšak při současném snížení tažnosti na 10 - 25%. Kromě automatových ocelí bývají velice dobře svařitelné. Jsou nemagnetické, ale zbytkový obsah feritu může způsobovat slabý feromagnetismus.

Nejdůležitější vlastností této skupiny materiálů je vysoká korozní odolnost, která se s narůstajícím množstvím legur zvyšuje. Z pohledu korozivzdornosti odolávají celkové korozi díky obsahu *Cr*, *Ni*, *Mo* případně *Cu* a *Si*. Mezikrystalové korozi odolávají po stabilizaci *Ti*, případně *Nb*. Bodové a štěrbinové korozi odolávají po legování *Mo*, s přispěním *Si* a *N*. Zlepšení odolnosti proti prasknutí způsobené korozi se docílí omezením obsahu *P*, *As*, *Sb*, popřípadě *Sn*. Jsou však náchylné ke korozi pod napětím.

Nerezové austenitické oceli se vyrábějí v mnoha druzích a rozdělují se do tří základních skupin:

- chróm - niklové oceli s 0,01 - 0,15% *C*, 12 - 25% *Cr*, 8 - 38% *Ni*, s možnými dalšími legurami - *N*, *Mo*, *Cu*, *Si* a stabilizované *Ti* a *Nb*,
- chróm - mangan - niklové oceli s 0,02 - 0,15% *C*, 12 - 22% *Cr*, 5 - 12% *Mn*, 3 - 8% *Ni*, s možnými dalšími legurami - *N*, *Mo* a *Cu*, stabilizované *Ti* a *Nb*,
- chróm - manganové oceli s 0,02 - 0,08% *C*, 10 - 18% *Cr*, 14 - 25% *Mn*, 3 - 8% *Ni*, s možnými dalšími legurami - *N*, *Mo* a *Cu*, stabilizované *Ti* a *Nb*.

Základním typem austenitické oceli je chrom - niklová ocel o jakosti AISI 304 (1.4301) hovorově se také nazývá „potravinářská“. Jedná se o nejvíce rozšířenou a používanou korozivzdornou ocel na trhu, která má nízký obsah C a tak je dobře svařitelná. Má velmi dobrou tažnost za studena. Při tváření se může zpevňovat. Dobře se ohýbá a ohraňuje. Ocel je velmi dobře leštitelná a odolává teplotám do 300 - 350 °C. Obrobitelnost není dobrá, ale obrábět se dá při použití ostře nabroušených nástrojů. Ocel je odolná proti vodě, vodní páře, vlhkosti vzduchu, jedlým kyselinám a slabým organickým i anorganickým kyselinám. Odolává povětrnostním vlivům mimo přímořských oblastí nebo mimo prostředí, kde je vyšší koncentrace agresivních chemických látek. Má široké spektrum použití. Používá se v potravinářském průmyslu, chemickém průmyslu, mlékárenském průmyslu, pivovarnickém průmyslu, ve vinařském průmyslu i ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu. Výrobky jsou značené jako stainless steel nebo inox 18/10.

2.2.5.4 Duplexní (austeniticko - feritické) oceli

Duplexní (austeniticko - feritické) oceli mají lepší mechanické vlastnosti a vyšší korozní odolnost než většina běžných feritických a austenitických ocelí [5]. Slovo „duplex“ popisuje mikrostrukturu oceli, která obsahuje přibližně 50% feritu a 50% austenitu. Charakteristické složení většiny duplexních ocelí je:

22 - 23% Cr, 4,5 - 6,5% Ni a 2,5 - 3,5% Mo.

Typickým představitelem duplexních ocelí je jakost AISI 318LN (1.4462). U duplexní oceli lze dosáhnout vyšší meze kluzu, zhruba 400 - 500 MPa. Ocel má dostatečnou houževnatost. Oproti jakosti AISI 304/304L má lepší odolnost proti korozi pod napětím a dvojnásobnou mez kluzu. S využitím vyšší pevnosti je možné uspořít určitou hmotnost konstrukce a tím dosáhnout snížení nákladů. Při legování Mo, Cu, eventuálně N lze dosáhnout vyšší korozní odolnosti proti mezikrystalové, bodové a štěrbinové korozi, a tím lze tento materiál použít v agresivních prostředích kyseliny sírové a fosforečné, mořské vody a v chloridech. Při zvýšených teplotách mezi 700 až 1000 °C, dochází k vytvrzování a tedy i křehnutí. Ke stárnutí oceli dochází při dlouhodobém zatížení v rozmezí teplot 350 až 550 °C (ocel také křehne).

Použití duplexních ocelí se rozšiřuje a začínají nahrazovat austenitické oceli používané pro různé aplikace v chemickém, jaderném a petrochemickém průmyslu.

2.3 Integrita povrchu

2.3.1 Základní specifikace integrity povrchu

Funkce každé součásti je úzce spojena s povrchem obrobene plochy [9]. Během dokončování funkčních ploch obrobku mohou v povrchové vrstvě vzniknout změny. Množství a rozsah těchto změn je třeba podrobit zkoumání, aby účelnost povrchu, vyjádřená jedinou celkovou charakteristikou - jakostí, byla v pojmech odpovídajících funkčním požadavkům a byla tedy hodnocena s ohledem na integritu této vzniklé plochy.

Jakost povrchu je tvarová a rozměrová přesnost povrchu obrobku [10]. Jakost spolu s integritou povrchu určují kvalitu povrchu.

Integrita povrchu je odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobene plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek [9].

Zkoumání integrity povrchu a provádění funkčních zkoušek je velmi významné. V současné době jsou totiž kladeny vysoké požadavky na jakost a to především z potřeby záruky vyšší spolehlivosti a životnosti.

Integritu povrchu lze obecně hodnotit na základě:

a) základních údajů o integritě:

- údaje o textuře povrchu,
- poruchy na povrchu,
- mikrotvrdost,
- mikro a makro trhliny,
- mikrostruktura,
- fázové transformace,
- zbytková napětí,

b) komplexních údajů o integritě, tj. všechny údaje uvedené v předchozím bodě a dále:

- mez únavy,
- odolnost proti korozi,
- kluzné vlastnosti,
- třecí vlastnosti,
- velikost stykových ploch apod.

Požadovaná jakost funkčních ploch - integrita povrchu se musí zohlednit již při prvotní konstrukci obrobku a volbě technologie výroby a následně se promítá i do oblasti měření a kontroly.

Jako nejvýznamnější a nejčastěji analyzované parametry, které charakterizují integritu povrchu po obrábění, se obvykle uvádí [10]:

- mikrogeometrie obrobeného povrchu,
- stupeň a hloubka zpevnění,
- strukturní fázové změny,
- smysl, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí.

2.3.2 Nejčastěji analyzované parametry integrity povrchu

2.3.2.1 Mikrogeometrie povrchu

Ze statistického hodnocení mikrogeometrie (mikroreliefu) obrobeného povrchu jsou pro kvalitativní i kvantitativní hodnocené vlastnosti povrchu využívány zejména výškové charakteristiky drsnosti povrchu a v některých případech, zatím však výjimečně, i tvarové charakteristiky profilu [11], včetně ostatních veličin jako například stupeň plnosti profilu, maximální hodnota, šikmost a špičatost funkce hustoty pravděpodobnosti a další [12].

V praxi obvykle užívané charakteristiky ne vždy zcela spolehlivě garantují plnou provozuschopnost obrobeného povrchu. Stručný přehled vzájemných souvislostí je shrnut v tabulce 2. Kde je: R_a - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, R_z - největší výška profilu (ISO 4287: 1998), $R_z(10)$ - výška nerovnosti profilu z deseti bodů (ISO 4287 - 1: 1984), R_{Sm} - průměrná šířka prvků profilu a R_{mr} - materiálový nosný podíl profilu.

2.3.2.2 Stupeň a hloubka zpevnění

Technologické procesy často způsobují změny mechanických vlastností nově vzniklého povrchu, tyto změny mají vliv na výslednou jakost součásti, zejména na její tribologii a únavové vlastnosti [13]. Zmíněné charakteristiky povrchové vrstvy se nejčastěji posuzují podle změn tvrdosti. Přehled zkoušek je naznačen v tabulce 3. Protože se většinou jedná o změny ve velmi tenkých vrstvách, lze je nejlépe hodnotit podle průběhu mikrotvrdosti. Pro měření hloubkových gradientů mikrotvrdosti se používají: metoda postupného odleptávání vrstev, metoda kolmých řezů a metoda šikmých řezů [1].

Tab. 2 Vztah mezi parametry struktury povrchu a funkcí plochy [12]

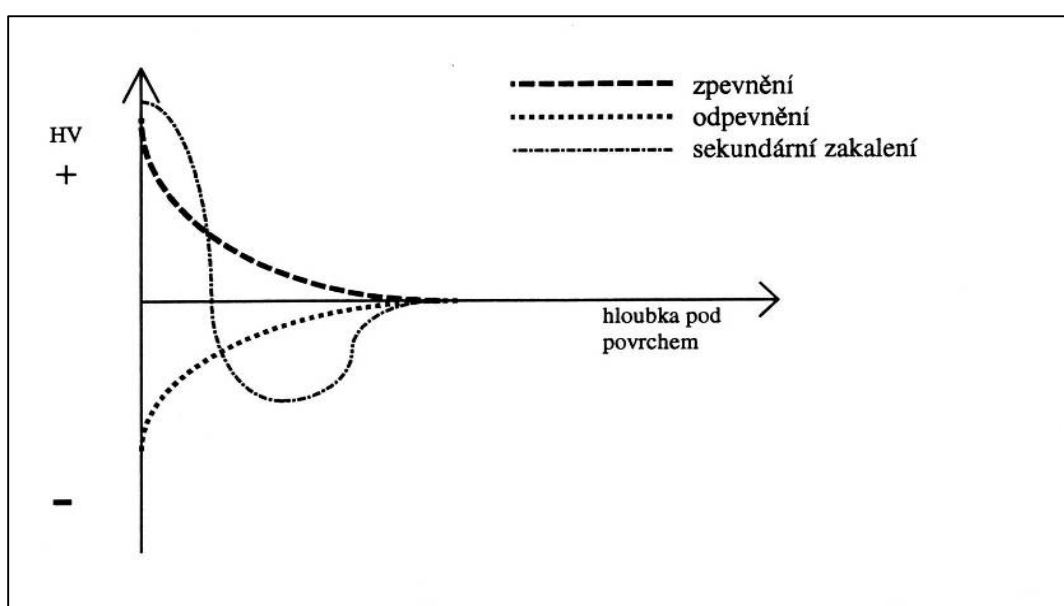
Provozní vlastnosti	Parametry struktury povrchu				
	<i>Ra</i>	<i>Rz (10)</i>	<i>Rz</i>	<i>RSm</i>	<i>Rmr</i>
Únavová pevnost	⊙	⊙	●	●	⊙
Kontaktní namáhání	●	⊙	⊙	●	●
Únosnost uložení	●	⊙	⊙	⊙	●
Těsnost spojení	●	⊙	⊙	●	●
Odolnost proti korozi	●	⊙	⊙	●	○
Elektrická a tepelná vodivost	●	⊙	⊙	●	●
Odrazivost	●	⊙	⊙	●	●
● Parametr vykazující podstatný vliv na danou vlastnost ○ Parametr nemá vliv na odpovídající vlastnost					

Tab. 3 Přehled zkoušek tvrdosti [14]

Rozdělení			Název metody
Zkoušky makrotvrdosti	Statické	Vrypové Vnikací	Podle Matense
			Podle Brinella
			Podle Rockwella
			Podle Vickerse
			Podle Knoppa
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda volným pádem
			Metoda stlačenou pružinou
			Porovnávací metoda
		Elastické odrazové	Metoda volným pádem (Shore)
			Metoda kyvadlová (Duroskop)
Zkoušky mikrotvrdosti	Statické	Vnikací	Metoda dle Vickerse (do 4,9 N)

V praxi se vyskytují tři charakteristické průběhy tvrdosti či mikrotvrdosti (obr. 4). Jejich existence je podmíněna mimo jiné výchozím materiálem obrobku a jeho původní strukturou, druhem ovlivnění a výslednou strukturou povrchových vrstev. Jedná se o zpevnění, odpevnění a zpevnění s následným poklesem pod tvrdost jádra. Posledně jmenovaný případ je výsledkem tzv. sekundárního zakalení způsobeného např. broušením.

Procesy zpevňování jsou většinou způsobeny změnami poruch krystalové mřížky, kdy roste pevnost a mez kluzu, ale klesá tažnost a vrubová houževnatost. Odpevňovací pochody a zotavování jsou důsledkem tepelných jevů během obrábění.



Obr. 4 Průběhy mikrotvrdosti v ovlivněných podpovrchových vrstvách dle [1]

2.3.2.3 Strukturní fázové změny

Každá změna struktury u kovů a jejich slitin v tuhém stavu je spojena se změnou uspořádání atomů [15]. Pohyb atomů v krystalové mřížce se mnohem snadněji uskutečňuje při existenci poruch krystalové mřížky a souvisí bezprostředně s teplotou. Při tomto pohybu musí atom překonat potenciální „bariéru“, způsobenou meziatomovými silami, které působí mezi pohybujícím se atomem a skupinou atomů sousedících s ním v původní i budoucí poloze. Pouze ty atomy, jejichž energie je větší o tzv. aktivační energii, mají možnost překonat bariéru a zaujmout jinou polohu. Aktivační energii získává atom (iont) při zahřívání či ochlazování soustavy (třeba jen místním). Změna má heterogenní průběh.

Změny struktury přicházející v úvahu u ocelí:

1. změna velikosti zrna (zpevnění, rekrytalizace apod.),
2. rozpad kalicích struktur,
3. přeměna zbytkového austenitu,
4. precipitace karbidů,
5. rekrytalizace (s případným znovuzakalením chladicím prostředím).

Ve všech těchto případech dochází ke změně struktury, která se projeví změnou mechanických vlastností materiálu v povrchové vrstvě obrobené součásti [16]. Ve většině případů dojde ke změně krystalových mřížek a s nimi spojeným změnám měrných objemů, které mají za následek vznik napjatosti v jednotlivých vrstvách.

Např. martenzitická přeměna probíhá rychlostí, která je přirovnávána k rychlosti šíření zvuku v oceli a uskutečňuje se i přes tuto značnou rychlost mechanismem tvorby zárodků (nukleací) a jejich růstem. Je to umožněno nedokonalostí původní struktury. V dokonalých krystalech je martenzitická přeměna nemožná. Překročení teploty M_s (martenzit start) o více jak cca 200 °C při současné plastické deformaci má za následek přeměnu martenzitu v původní fázi - austenit.

2.3.2.4 Smysl, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí

Působením vnějších sil či momentů na soustavu vznikají napětí, která se někdy označují jako napětí vložena [17]. Naproti tomu vnitřní napětí jsou v systému obsažena, aniž by působilo vnější zatížení. Vnitřní silové účinky (síly, momenty), od nichž vzniká vnitřní napětí, jsou v uzavřené soustavě v rovnováze a mimo ni se neprojevují. Pokud však dojde k porušení celistvosti soustavy, vnitřní napětí se uvolní a způsobí deformaci soustavy.

Podle doby trvání lze rozlišovat vnitřní napětí:

- a) *Vložená* - vznikají při silovém působení na těleso. Je-li navíc působením vnějších sil vyvolána elastická deformace v systému, pak stav napjatosti v tělese bude existovat tak dlouho, pokud budou vnější síly působit. Vložená napětí vznikají např. působením povrchových sil nebo také nemechanickými ději, např. přítomností nehomogenního teplotního pole v tělese.
- b) *Zbytková* - zůstávají i po odstranění příčin, které je vyvolaly. Pro jejich vznik musí vložena napětí překročit mez kluzu.

Rozdělení zbytkových napětí do kategorií se řídí několika kritérii [18]. Nejčastější dělení je podle velikosti objemu, v kterém dosahují rovnováhy:

- a) *Zbytková napětí I. druhu (makroskopická)* - jsou přibližně homogenní ve velkých oblastech, tj. konstantní co do směru a velikosti, v celém objemu objektu dosahují zbytková napětí I. druhu, nazývaná také makroskopická, rovnováhy.
- b) *Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická)* - jsou homogenní v objemu několika krystalků. Ve vícefázových soustavách mohou být krystalky různých fází napjaty opačně.
- c) *Zbytková napětí III. druhu (submikroskopická)* - projevují se v rozsahu několika meziatomových vzdáleností a doprovázejí mřížkové poruchy v reálných krystalech.

Zbytková napětí těchto tří druhů se zpravidla vyskytují současně, i když pod pojmem zbytková napětí se rozumí především makroskopická zbytková napětí (napětí I. druhu). Jejich existence se projevuje řadou prakticky významných efektů, nejznámější jsou:

- geometrické důsledky zásahu do napěťové rovnováhy se projeví rozměrovými a tvarovými změnami, které ovlivní využitelnost součásti nebo technologie jejího dalšího zpracování,
- vliv zbytkových napětí na životnost, bezporuchovost a korozní odolnost strojních komponent.

Tlaková zbytková napětí vyvolaná některými způsoby úpravy povrchu cyklicky namáhaných součástí (např. kuličkováním) vedou k výraznému prodloužení jejich životnosti. Naopak tahová zbytková napětí podporují vznik trhlin, napěťovou korozi, snížení meze únavy atd. Nejčastějším případem negativního vlivu vysokých tahových napětí je vznik trhlin v okolí svarových spojů při chladnutí a fázových transformacích i bez působení dodatečných vnějších sil.

Příčiny vzniku zbytkových napětí

Příčin vzniku zbytkových napětí je celá řada [18]. Vznikají v určité oblasti materiálu při její nehomogenní plastické deformaci. Podmínkou pro jejich vznik je

překročení meze kluzu. V souvislosti s procesy probíhajícími během technologických operací jsou jako hlavní příčiny zbytkových napětí označovány:

1. *Nerovnoměrné plastické deformace* - vyvolané mechanickými silami a momenty (silový účinek).
2. *Nerovnoměrný ohřev a ochlazování* - způsobují nerovnoměrné roztažení či smršťování materiálu (tepelná napětí).
3. *Nerovnoměrné změny struktury* - pokud dochází k rozdílu měrných objemů původní a nově vzniklé struktury (strukturální napětí).
4. *Chemické procesy* – zejména absorpce, difuze a s nimi spojené chemické reakce pronikajících částic cizích látek a plynů.

Uvedené příčiny nepůsobí samostatně, ale při technologických operacích působí současně jejich různé kombinace.

2.4 Teoretické základy použitých metod

2.4.1 Mikrogeometrie povrchu - drsnost povrchu a jeho profil

Drsnost povrchu a jeho profil patří mezi základní ukazatele jakosti povrchu a povrchové vrstvy [19]. Nejčastěji je tento ukazatel využíván v průmyslové praxi. Hodnoty drsnosti jsou předepisovány na výkresy součástí, čímž předem určují, za jakých řezných podmínek a jakými nástroji bude součást a příslušná plocha obráběna. S kvalitou povrchu úzce souvisí třída přesnosti *IT*. S rostoucími nároky na kvalitu povrchu roste také třída přesnosti *IT*, jejímž výsledkem jsou rostoucí výrobní náklady. To je způsobeno tím, že se v mnoha případech už nevystačí s konvenčními obráběcími stroji a nástroji, ale je nutné pořízení různých typů CNC strojů, aby se tyto požadavky splnily.

Často se v praxi stává, že je předepisována zbytečně vysoká kvalita povrchu v parametru drsnosti kvůli dobrému vzhledu součásti, čímž se neekonomicky zvyšují náklady na výrobu. Ovšem tato estetická stránka nemá nic společného s kvalitou povrchu, která nás zajímá.

Norma ČSN EN ISO 4287 popisuje velké množství parametrů drsnosti povrchu, jejich výpočet a hodnocení. V současnosti existuje přes 250 různých parametrů, kterými lze hodnotit a popisovat drsnost povrchu [11].

Jedny z nejčastěji používaných parametrů v podmínkách běžného strojírenství jsou R_a (střední aritmetická úchylka profilu), R_z (maximální úchylka profilu), R_t (součet nejvyššího výstupku profilu a nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky) atd., které se obvykle předepisují na výkresech součástí. Tyto parametry a mnoho dalších se měří profiloměry a drsnoměry.

2.4.2 Zkouška mikrotvrdomosti

Název mikrotvrdomost se ustálil pro tvrdost určenou použitím zcela malých zatížení, tak aby vznikly vtisky nepatrné velikosti [20]. Často se uvádí 2 N jako hranice mezi makro a mikrotvrdomostí. Mikrotvrdomost nelze určovat obvyklými tvrdoměry, neboť vyžaduje nesrovnatelně větší přesnost jak při zatěžování, tak i při proměřování vtisku. Nejpřesnější je přímé zatěžování závažím nebo přesně cejchovanou pružinkou. K proměřování vtisku slouží přesná optika.

Pro zkoušky mikrotvrdomosti jsou použitelné jediné vnikací metody s diamantovým indentorem. Prakticky přichází v úvahu pouze metoda Vickersova, Knoopova nebo Bierkovičova.

Podstata zkoušky podle Vickerse:

Princip zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse je následující. Diamantové vnikací těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem (136°) mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Následně je měřena úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního tělesa [20].

Hlavními výhodami měření mikrotvrdomosti jsou: relativní jednoduchost, rychlost, opakovatelnost a možnost měření přímo na výrobku, na jeho polotvaru nebo na zkušebním tělese vyrobeném a určeném pro jiné druhy mechanických zkoušek.

Tvrdomost podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně a je určena poměrem vtlačovací síly F a povrchem vtisku (1.1), kde d_v je úhlopříčka vtisku [21].

$$HV = 0.189 \cdot \frac{F}{d_v^2} \quad (1.1)$$

2.4.3 Pozorování struktury

Postup pozorování struktury je v našem případě popsán v následujících šesti bodech [22]:

a) Odběr vzorku - vzorky z tvrdých a těžko obrobitelných materiálů se dělí odlamováním nebo rozbrušováním pod chladicí kapalinou nebo pomocí drátového elektroerozivního řezání (WEDM).

Při odběru vzorku nesmí dojít k mechanickému ani tepelnému ovlivnění jeho struktury. Vzorek proto nesmí být plasticky deformován a jeho teplota nesmí dosáhnout teploty případných fázových transformací.

Velikost vzorku se volí podle možností mikroskopu, pomocí něhož se bude poté pozorovat, a zohledňuje se i plánovaný postup přípravy vzorku.

Místo, ze kterého bude vzorek odebrán, musí být zvoleno tak, aby vzorek vystihl charakter zkoumané struktury součásti. Není-li součást strukturně homogenní, je nutné odebrat více vzorků z několika míst.

b) Příprava vzorku - malý vzorek, vložený do formy, se zaleje za studena připravenou hmotou. (V praxi se používají dva základní typy preparace - za studena nebo za tepla.) Důvodem preparace vzorků je snadnější manipulace při následujících operacích.

c) Broušení vzorku - při broušení dochází k intenzivnímu odebrání hmoty z povrchu materiálu. Cílem je dosáhnout rovinného povrchu vzorku s minimálním poškozením, které se snadno odstraní při leštění. Podle techniky provádění se dělí na: ruční broušení a mechanizované broušení (pomocí brusných a leštících strojů).

d) Leštění vzorku - leštění je dalším krokem na cestě za kvalitním výbrusem. Na rozdíl od broušení při leštění již materiál z povrchu vzorku neubývá, ale nastává pouze deformace vrcholů povrchové drsnosti.

e) Leptání vzorku - leptání vzorků slouží k vyvolání jejich mikrostruktury. V závislosti na materiálu výbrusu a konkrétních požadavcích pro následné pozorování je možné aplikovat různé metody leptání vzorků. Základní způsoby leptání vzorků jsou: chemické, elektrolytické a tepelné. Leptání je nejcitlivější operací při přípravě metalografických vzorků. Každý materiál vyžaduje speciální techniku leptání včetně volby leptadla.

V našem případě je použité elektrolytické a chemické leptání. Chemické leptání je proces, při kterém na povrch vyleštěného vzorku necháme působit chemická leptadla. Elektrolytické leptání se používá u kovů a slitin, které jsou odolné vůči účinkům běžných leptadel, a často se používá také u korozivzdorných ocelí. Elektrolytické leptání spočívá v anodickém nebo katodickém rozpouštění vzorku v elektrolytu při průchodu elektrického proudu.

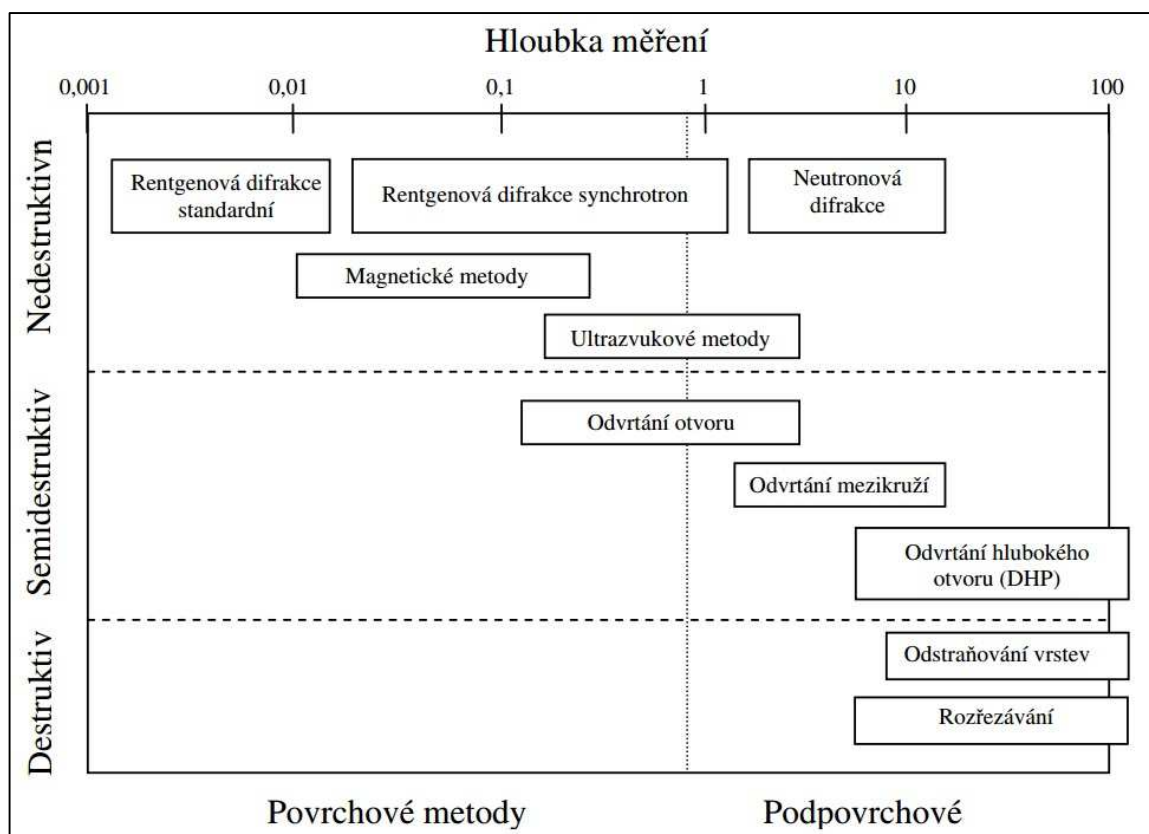
Princip vyvolání mikrostruktury je díky rozdílné rozpouštěcí schopnosti jednotlivých strukturních součástí a dochází ke vzniku povrchového reliéfu, a tím k jejich zviditelnění.

f) Hodnocení výbrusu - makroskopické a mikroskopické pozorování umožňují zjistit velikost, tvar a rozložení jednotlivých strukturních součástí, sledování krystalizace, studium svarů, stanovení směru a míry deformace zrn tvářené struktury, určení míry prokalení, tloušťky nauhličené nebo oduhličené vrstvy a obecně stanovení jakosti tepelného a chemicko - tepelného zpracování či vhodnosti materiálu k určitému použití a další.

2.4.4 Metody pro měření zbytkových napětí

Zbytková napětí jsou vnášena do součástí během jejich výroby a dále se mohou přerozdělovat během pozdějšího tepelného nebo mechanického zpracování nebo v průběhu provozního zatěžování [23]. Spolehlivé stanovení původu zbytkových napětí v kombinaci s provozním namáháním je nezbytné pro stanovení jejich vlivu na životnost součástí. Přes rozšiřování výpočetních metod pro určování zbytkových napětí bude experiment vždy nezbytný pro jejich verifikaci. Metody pro měření zbytkových napětí je možno obecně rozdělit na destruktivní, semidestruktivní (odvrtávací metoda s tenzometry) a nedestruktivní (obr. 5).

Destruktivní metody určování zbytkových napětí jsou založeny na změně napěťového stavu odstraněním části materiálu nebo rozřezáním součásti a měření deformace, odpovídající této změně, zatímco nedestruktivní metody využívají závislosti mezi fyzikální nebo krystalickou vlastností materiálu a zbytkovým napětím.



Obr. 5 Metody pro měření zbytkových napětí [23]

2.4.4.1 Rentgenografická metoda $\sin^2\psi$ pro určení zbytkových napětí

Specifické rysy metody, kterými se odlišuje od jiných tenzometrických metod:

- Měření jsou omezena jen na krystalické látky nebo na krystalické fáze částečně amorfních materiálů [24].
- V tenké povrchové vrstvě jsou měření zcela nedestruktivní. Ke stanovení hloubkového profilu mřížkové deformace (napětí) lze kombinovat difrakční analýzu s postupným odleptáváním povrchu.
- Mřížkové vzdálenosti, které slouží v difrakční tenzometrii jako “měrky”, jejichž změnu velikosti určujeme, jsou asi o 8 řádů menší než “měrky” užívané obvyklými mechanickými nebo elektromechanickými metodami.
- U jednofázových materiálů je měření deformace omezeno jen na vhodně orientované krystalky uvnitř objemu “ozářeného” svazkem

rentgenových paprsků, u vícefázových soustav se informace získá pouze od jednotlivých krystalků jedné fáze. Získané výsledky budou proto ovlivněny elastickou anizotropií krystalků zkoumaného objektu.

- U vícefázových soustav lze využít selektivní vlastnosti difrakční metody a stanovit mřížkové deformace na krystalcích každé fáze zvlášť. Rentgenová tenzometrie tedy umožňuje principiálně měřit zbytková napětí I. i II. druhu ve vícefázových polykrystalických materiálech.

Podstata

Každé zrna polykrystalického materiálu je vlivem působení napětí prodlouženo ve směru působení tahového napětí a stlačeno ve směru kolmém, jak je možné vidět na obrázku 6 (I_0 a I jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření) [25]. Díky tomu dojde ke změně mezivzdálenosti krystalických rovin kolmých k tahové nebo tlakové síle o $\pm \Delta d_{hkl}$. Za neměnné vlnové délky λ záření rovněž dojde i ke změně úhlové polohy θ interferenčního maxima difraktovaného záření, které je definováno Braggovou rovnicí (2.1), kde n je řád interference resp. difrakce.

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (2.1)$$

Deformaci ε napjatého krystalu silou v rovině hkl je možné stanovit diferencováním (2.1). Dostaneme vztah:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cot g \theta_0 (\theta - \theta_0), \quad (2.2)$$

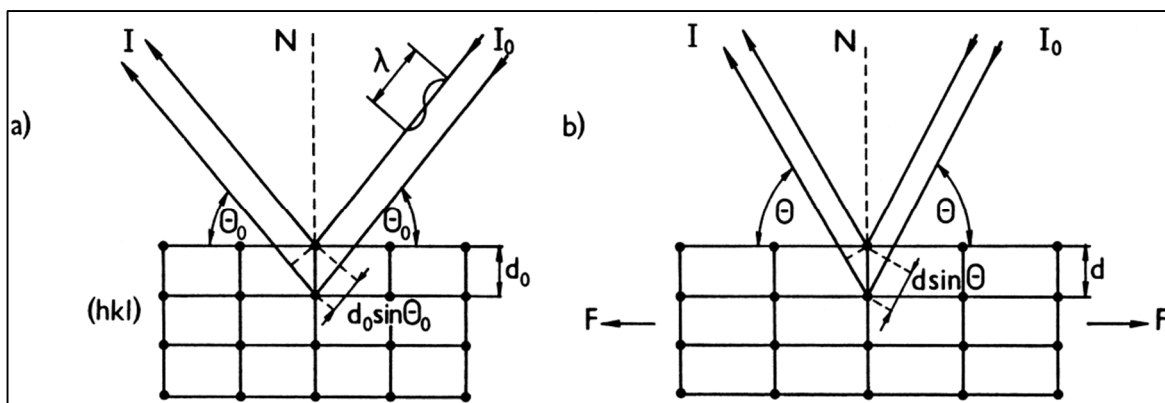
kde d_0 a θ_0 jsou hodnoty odpovídající nenapjatému krystalu [26].

Z výše uvedené deformace ε vede ke stanovení požadované složky napětí σ_φ ještě poměrně dlouhá cesta odvozováním, což není předmětem této práce. Proto zde uvedu jen pro výpočet důležité elastické konstanty:

$$s_1 = \frac{-\nu}{E}, \quad \frac{1}{2}s_2 = \frac{\nu + 1}{E}, \quad (2.3)$$

kde E je Youngův modul a ν je Poissonovo číslo, s následným vzorcem pro výpočet požadovaného napětí σ_φ :

$$\sigma_\varphi = -\frac{1}{\frac{1}{2}s_2} \cot g \theta_0 \frac{\partial \theta_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi}. \quad (2.4)$$

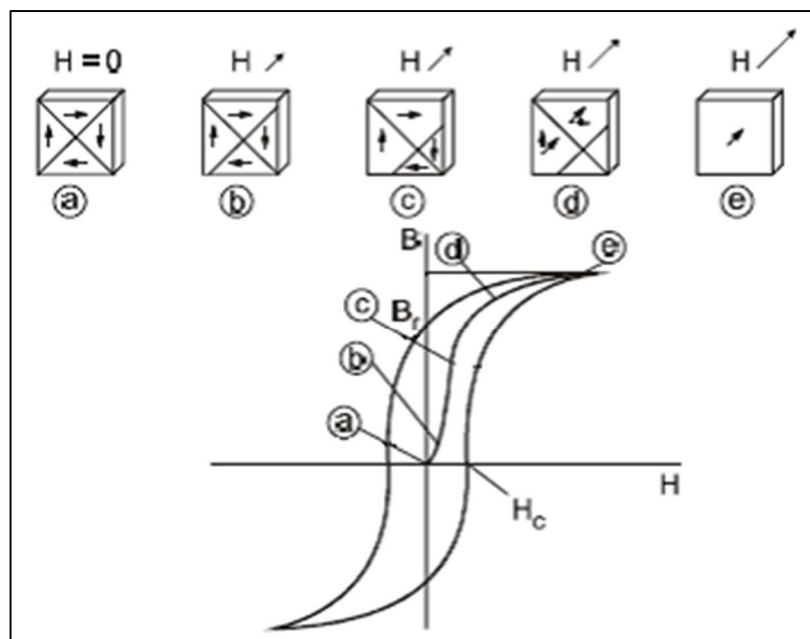


Obr. 6 Deformace vzdáleností mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima, a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou F [26]

Jedna z prakticky významných zvláštností rentgenové tenzometrie spočívá v tom, že povrch zkoumaného materiálu není třeba před vlastním měřením speciálně upravovat [26]. Běžná drsnost, s níž se obvykle po opracování nebo tváření setkáváme, není na závadu. Vždy je však třeba uvážit, jaké důsledky má pro řešení dané úlohy nepatrná hloubka vnikání používaných rentgenových paprsků.

2.4.4.2 Analýza Barkhausenova šumu

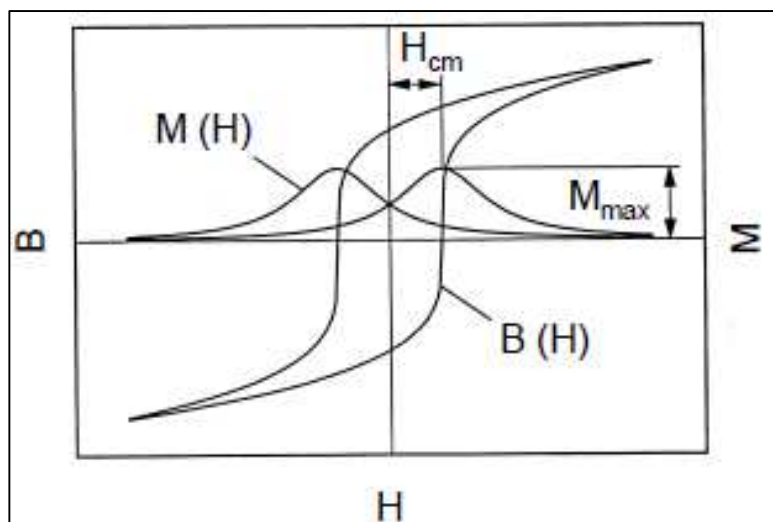
Nespojitá změna magnetizace při spojitě změně budícího magnetického pole, která je známá jako Barkhausenův jev nebo šum, byla popsána již v roce 1919 [27]. Koercitivní sílu H_C , magnetickou saturaci a remanentní magnetizaci lze určit z hysterezní křivky. Jednotlivé parametry jsou výrazně ovlivněny tvrdostí materiálu (která je dána mikrostrukturou materiálu a chemickým složením) a jeho napěťovým stavem. Analýza Barkhausenova šumu pro odhad stavu zbytkových napětí využívá magneto - elastickou interakci mezi magnetickým posunutím doménové stěny a elastickým napětím ve feromagnetických materiálech. Vlivem zatížení tahovými napětími oblasti, ve kterých je směr magnetizace rovnoběžný se směrem zatížení, vlivem pohybu Blochových stěn rostou. Zároveň oblasti kolmé na směr magnetizace se zmenšují, až úplně zanikají. Působením zatížení tlakovými napětími je efekt opačný, oblasti, ve kterých je směr magnetizace kolmý na směr zatížení, se zvětšují.



Obr. 7 Hysterezní magnetická křivka feromagnetických materiálů [27]

Tento jev pohybu Blochových stěn lze použít k vysvětlení hysterezní křivky ve feromagnetických materiálech, viz obrázek 7 [27]. Se vzrůstající excitací se domény natáčí do směru vnějšího magnetického pole. Oblast (a) je reverzibilní, ale od okamžiku rotace Blochovy stěny (b) jde o nevratnou magnetizaci, která postupně vede až k saturaci materiálu (e). Nevratné pohyby Blochových stěn vedou ke zbytkové magnetizaci nazývané remanence B_r . Na její eliminování je potřebné pole intenzity H_c , které bude působit v opačném směru. Jak už bylo řečeno, přítomnost napětí vede k deformaci hysterezní smyčky, kdy maximum magnetizace je u tahových napětí vyšší oproti tlakovým napětím.

Blochovy stěny, které oddělují feromagnetické domény s různou magnetickou orientací, se vlivem externího magnetického pole pohybují [28]. Tento skokový pohyb je možné identifikovat jako elektrický pulz pomocí malé cívky z elektricky vodivého drátu. Odpovídajícími parametry jsou maximum Barkhausenova šumu M_{max} a maximum koercitivní síly H_{cm} , kdy dosahuje Barkhausenův šum maxima, viz obrázek 8.



Obr. 8 Magnetická hysterezní křivka s Barkhausenovým šumem a koercitivní silou [28]

Signál Barkhausenova šumu je exponenciálně tlumen. Hlavní příčinou jsou vířivé proudy, které ovlivňují elektromagnetické pole pohybujících se Blochových stěn.

S rostoucími tlakovými napětími a tvrdostí ve feromagnetických materiálech se snižuje intenzita Barkhausenova šumu [27]. Velikost zbytkového napětí lze také analyzovat z tvaru hysterezní smyčky, respektive z její deformace v porovnání s tvarem této křivky bez účinku napětí.

3. Experimentální část

Experimentální část práce se věnuje samotným experimentům a následně měření parametrů integrity povrchu. Kapitola obsahuje použité materiály (podkapitola 3.1), stroje, nástroje, měřicí zařízení a pomůcky (podkapitola 3.2), dále řezné podmínky (podkapitola 3.3), metodiku experimentů a měření (podkapitola 3.4 - 3.5) a dosažené výsledky měření (podkapitola 3.6)

3.1 Zkušební vzorky

Jako polotovary pro výrobu experimentálních vzorků byly zvoleny bezešvé trubky o průměru 101,6 x 8,08 mm s jakostí AISI 304 a AISI 318 LN dodané firmou ITALINOX s.r.o., které se velmi blížily připravované součásti vyvíjeného zařízení.

Po převzetí trubek nadělených na segmenty o délce 200 mm byly trubky vyžihány k částečnému odstranění zbytkových napětí z polotovaru. Délka trubek byla volena s ohledem na upínání do sklíčidla za vnější průměr a tuhost při obrábění.

3.1.1 Specifikace materiálu AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel

Jedná se o nerezovou ocel s austenitickou strukturou, která je nemagnetická [29], viz podkapitola 3.2. Ocel má vysoký sklon k deformačnímu zpevnění, které vzniká přetvořením austenitu na deformační martenzit, jenž zvýší pevnost, sníží tažnost a způsobí magnetovatelnost. Další vlastnosti této oceli jsou uvedeny v podkapitole 2.2.5.3.

Pro tyče do průměru 160 mm platí následující materiál. vlastnosti [30], [31]:

- mez kluzu $R_{p0,2} = 190 \text{ MPa}$,
- mez $R_{p1,0} = 225 \text{ MPa}$,
- mez pevnosti $R_m = 500 - 700 \text{ MPa}$,
- tvrdost 170 HV,
- tažnost A_{min} podélná = 45%,
- vrubová houževnatost $KV = 100 \text{ J}$ (podélný směr zkoušení),
- velmi malá tepelná vodivost 16 W/m.K (50 W/m.K u uhlíkové 12 050),
- vyšší teplotní roztažnost 17 $\mu\text{m/m.K}$ (11 $\mu\text{m/m.K}$ u běžných ocelí).

V tabulce 4 je chemické složení oceli o jakosti AISI 304. Vliv jednotlivých prvků je uveden v podkapitole 2.2.3.

Tab. 4 Chemické složení oceli AISI 304 v % [30]

C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	N max.	Cr	Ni
0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	0,11	17,00 - 19,50	8,00 - 10,50

3.1.2 Specifikace materiálu AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel

Nerezová ocel s vyváženou strukturou austenitu (50%) a feritu (50%), která má lepší mechanické vlastnosti a vyšší korozní odolnost než většina běžných feritických a austenitických ocelí [5]. Další vlastnosti této oceli jsou zmíněny v podkapitole 2.2.5.4.

Pro tyče do průměru 160 mm platí následující materiál. vlastnosti [30],[31]:

- mez kluzu $R_{p0,2} = 450$ MPa,
- mez $R_{p1,0} = 700$ MPa,
- mez pevnosti $R_m = 650 - 880$ MPa,
- tvrdost 270 HV,
- tažnost A_{min} podélná = 25%,
- vrubová houževnatost $KV = 100$ J (podélný směr zkoušení),
- velmi malá tepelná vodivost 19 W/m.K (50 W/m.K u uhlíkové 12 050),
- vyšší teplotní roztažnost 14 $\mu\text{m/m.K}$ (11 $\mu\text{m/m.K}$ u běžných ocelí).

V tabulce 5 je chemické složení oceli o jakosti AISI 304. Vliv jednotlivých prvků je uveden v podkapitole 2.2.3.

Tab. 5 Chemické složení oceli AISI 318 LN v % [30]

C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	N	Cr	Mo	Ni
0,03	1,00	2,00	0,035	0,015	0,10 - 0,22	21,00 - 23,00	2,50 - 3,50	4,50 - 6,50

3.2 Popis strojů a pomůcek pro experimenty

V této podkapitole jsou postupně popsány všechny použité stroje, nástroje, měřidla, pomůcky a měřicí zařízení, použité při experimentech a měření hodnocených parametrů integrity povrchu.

3.2.1 Obráběcí stroj

Obrábění probíhalo na moderním CNC Soustruhu OKUMA Genos L200E - M (obr. 9) za intenzivního tlakového přívodu procesní kapaliny. Obráběcí centrum je umístěno v laboratoři obrábění v Praze na ČVUT. Jeho základní parametry jsou v tabulce 6.



Obr. 9 CNC Soustruh OKUMA Genos L200E - M

Tab. 6 Základní parametry CNC Soustruhu OKUMA Genos L200E - M [32]

Pracovní prostor		Strojní data	
Velikost sklíčidla	8 "	Šířka	2081 mm
Max. oběžný průměr	450 mm	Hloubka	1550 mm
Obráběný Ø - max.	200 mm	Výška	1569 mm
Max. obráběná délka	380 mm	Hmotnost stroje	3800 kg

Pokračování tab. 6

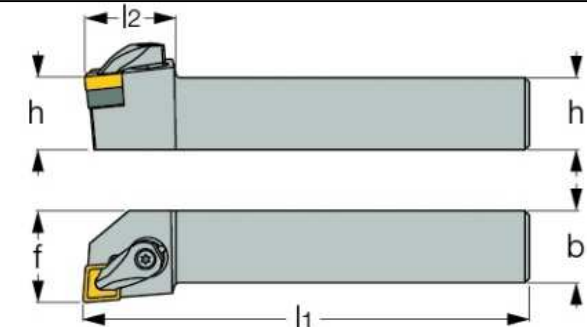

Vřeteno		Revolverová hlava	
Otáčky	107 - 4500 ot/min	Počet nástrojových míst	12
Zakončení vřetene	JIS A2 - 6	Upnutí: vnější obrábění	20 x 20 mm
Vrtání vřetene Ø	66 mm	Upnutí: vnitřní obrábění - Ø	32 mm
Výkon	11,0/7,5 kW	Otáčky hnaného nástroje	50 - 6000 ot/min
NC koník		Výkon	4,0/1,8 kW
Upnutí hrotu	5 MK	Ostatní	
Pojezd	100 mm	Motor čerpadla	250 W

3.2.2 Nástroj

Všechny části použitého nástroje byly od firmy ISCAR, která je v tomto odvětví jednou z předních světových výrobců.

3.2.2.1 Držák vyměnitelných břitových destiček

Na veškeré soustružení byl vybrán jeden typ držáku (obr. 10), do kterého bylo použito více typů vyměnitelných břitových destiček (VBD). Jednotlivé typy VBD s různými utvařeči představují proměnlivou geometrii břitu. Označení držáku od výrobce je ISCAR DCLNL - 2020K - 12. Jedná se o nůž pro podélné soustružení, v provedení pravý. Vzhledem k jeho geometrii provedení ho lze využít i na čelo. Je určen pro destičku s vrcholovým úhlem špičky 80°. Úhel nastavení hlavního ostří je 95°, úhel nastavení vedlejšího ostří je 5°. Při použití kosočtverečné oboustranné destičky bez utvařeče má nástroj negativní úhel čela - 6° a negativní úhel sklonu hlavního ostří - 6° [33].

						
h [mm]	b [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	f [mm/ot]	γ_0 [°]	Λ_s [°]
20	20	125	35	25	- 6	- 6

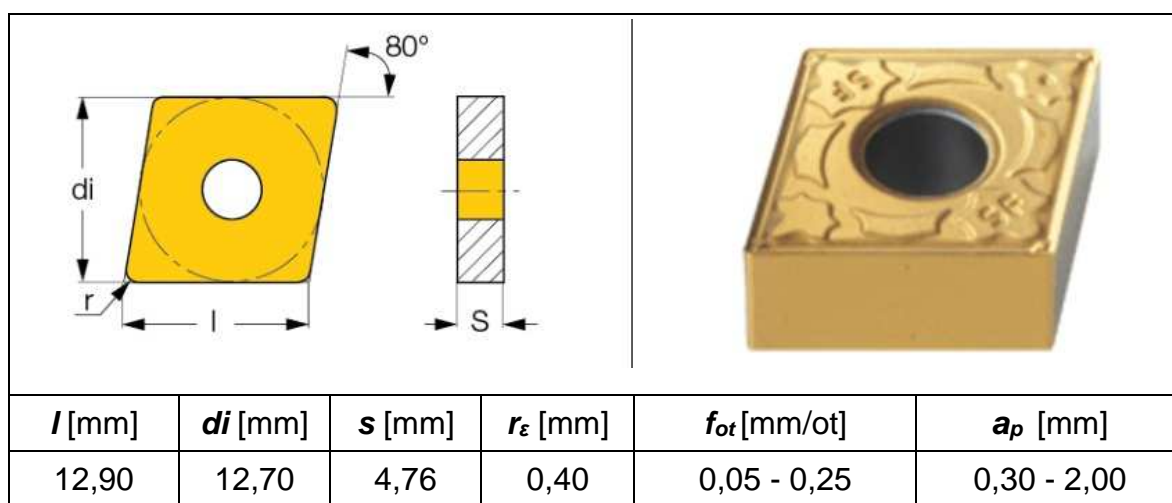
Obr. 10 Držák vyměnitelných břitových destiček použitý při experimentech [33]

3.2.2.2 Vyměnitelné břitové destičky

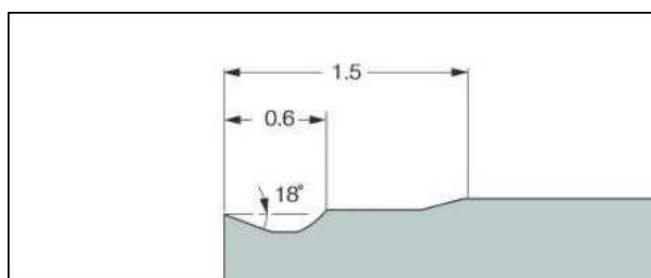
Do držáků byly vybrány 4 typy vyměnitelných břitových destiček s různou geometrií utvařeče. Geometrie utvařeče pro naše experimenty představuje úhel čel v rovině ortogonální γ_o . Destičky mohou být a nadále budou rozlišovány označením utvařeče (SF, PP, NF, F3M).

1. CNMG 120404 - SF (obr. 11)

Oboustranná 80° kosočtverečná destička pro dokončování za nízkých posuvů a hloubek záběru. Vysoká odolnost vůči výmolu břitu [33]. Geometrie utvařeče SP v ortogonální rovině je na obrázku 12.



Obr. 11 Rozměrová charakteristika destičky CNMG 120404 - SF [33]



Obr. 12 Geometrie utvařeče SF v rovině ortogonální [33]

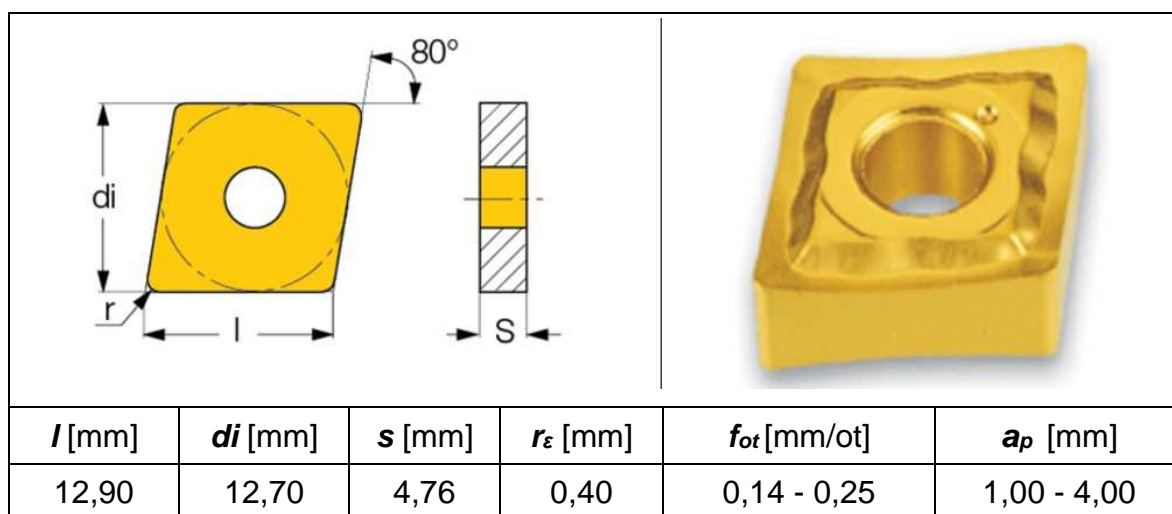
V kombinaci s držákem lze výslednou geometrii nástroje popsat následovně:

- úhel čela γ_o : $+18^\circ - 6^\circ = +12^\circ$,
- úhel hřbetu $\alpha_o = 6^\circ$,
- úhel břitu $\beta_o = 72^\circ$,
- poloměr zaoblení špičky $r_\epsilon = 0,4$ mm.

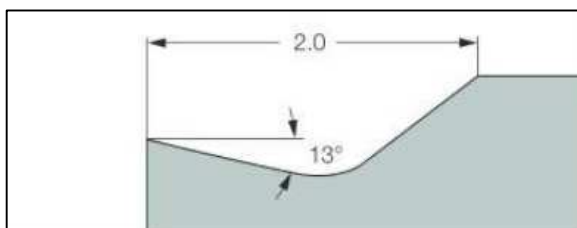
Dno utvařeče je cca ve vzdálenosti 0,3 mm od ostří. Při experimentech byl použit malý posuv na otáčku 0,14 mm/ot, a proto geometrii utvařeče lze považovat za geometrii čela.

2. CNMG 120404 - PP (obr. 13)

Oboustranná 80° kosočtverečná destička s pozitivním úhlem čela pro obrábění velmi tvárných materiálů jako jsou slitiny hliníku, měkké, nízkouhlíkové oceli, nerez oceli a žárupevné slitiny [33]. Geometrie utvařeče PP v ortogonální rovině je na obrázku 14.



Obr. 13 Rozměrová charakteristika destičky CNMG 120404 - PP [33]



Obr. 14 Geometrie utvařeče PP v rovině ortogonální [33]

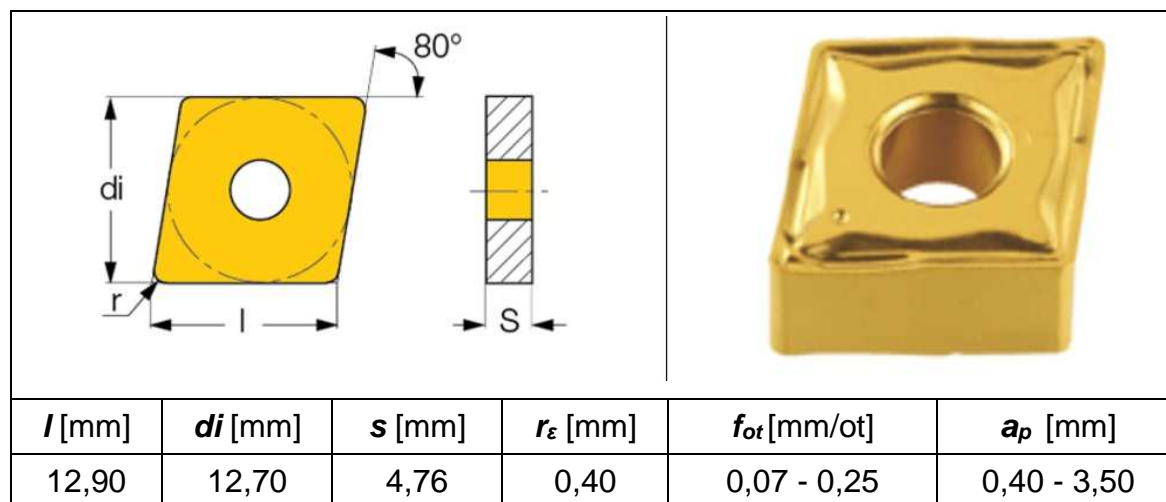
V kombinaci s držákem lze výslednou geometrii nástroje popsat následovně:

- úhel čela γ_o : $+13^\circ - 6^\circ = +7^\circ$,
- úhel hřbetu $\alpha_o = 6^\circ$,
- úhel břitu $\beta_o = 77^\circ$,
- poloměr zaoblení špičky $r_\epsilon = 0,4$ mm.

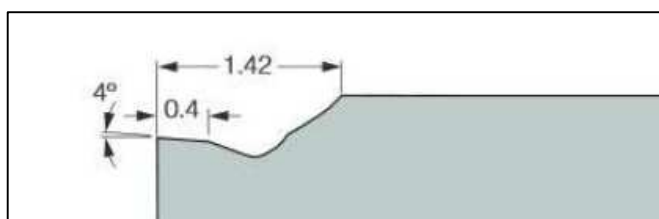
Dno utvařeče je cca ve vzdálenosti 1 mm od ostří. Při experimentech byl použit malý posuv na otáčku 0,14 mm/ot, tudíž geometrii utvařeče lze považovat za geometrii čela.

3. CNMG 120404 - NF (obr. 15)

Oboustranná 80° kosočtverečná destička pro dokončování a předfinální řez [33]. Výrobce prezentuje, že díky velmi ostré řezné hraně (zřejmě malému poloměru ostří) a pozitivnímu úhlu čela by destička měla zajišťovat nízký řezný odpor. Geometrie utvařeče NP v ortogonální rovině je na obrázku 16.



Obr. 15 Rozměrová charakteristika destičky CNMG 120404 - NF [33]



Obr. 16 Geometrie utvařeče NF v rovině ortogonální [33]

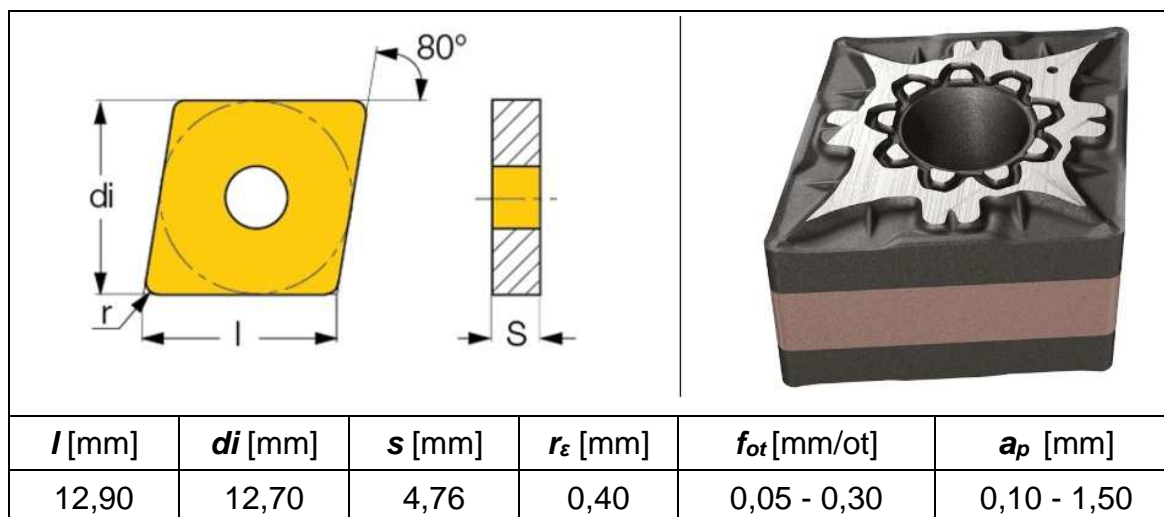
V kombinaci s držákem lze výslednou geometrii nástroje popsat takto:

- úhel čela γ_o : $+4^\circ - 6^\circ = -2^\circ$,
- úhel hřbetu $\alpha_o = 6^\circ$,
- úhel břitu $\beta_o = 86^\circ$,
- poloměr zaoblení špičky $r_\epsilon = 0,4$ mm.

Posuv na otáčku 0,14 mm/ot je menší než fazeta utvařeče, takže geometrie fazety je pro nás úhel čela.

4. CNMG 120404 - F3M (obr. 17)

Oboustranná 80° kosočtverečná destička pro dokončování nerezových ocelí [33]. Přesná geometrie utvařeče není výrobcem publikována. Uvádí se jako pozitivní destička s proměnným úhlem čela utvařeče. Z měření na optickém mikroskopu a konzultaci s prodejcem nástrojů vyplívá, že v místě špičky nástroje je pravděpodobně 0° .



Obr. 17 Rozměrová charakteristika destičky CNMG 120404 - F3M [33]

V kombinaci s držákem lze výslednou geometrii nástroje popsat následovně:

- úhel čela γ_o asi: $0^\circ - 6^\circ = -6^\circ$,
- úhel hřbetu $\alpha_o = 6^\circ$,
- úhel břitu $\beta_o = 90^\circ$,
- poloměr zaoblení špičky $r_\varepsilon = 0,4$ mm.

Po měření na optickém mikroskopu bylo zjištěno, že délka fazety je větší než zvolený posuv na otáčku $0,14$ mm/ot, proto geometrie fazety pro nás představuje úhel čela nástroje.

3.2.3 Manuální stolní metalografická rozbrušovací pila

Nařezané kroužky z jednotlivých trubek metodou WEDM se dělily na segmenty (obr. 18), které se následně měřily na jednotlivých pracovištích. K tomu byla použita manuální stolní metalografická rozbrušovací pila Labotom - 3 značky Struers (obr. 19). Je to rozbrušovací pila pro kotouče $\varnothing 250$ mm. Její ovládací panel má pouze tři tlačítka: start, stop a čištění vodou. Nachází se v laboratoři obrábění na ČVUT v Praze. Základní technické údaje jsou shrnuty v tabulce 7.



Obr. 18 Segment měřeného kroužku

Tab. 7 Tech. data rozbruš. pily Labotom - 3 [34]

Výkon motoru	3,2 kW
Otáčky kotouče	3450 ot/min
Rozměry kotouče	250 mm x 1 až 1,5 mm x 32 mm
Rozměry stolu	200 x 215 mm s třemi 10 mm T - drážky
Maximální rozměry obrobku	
Max. řezný průměr	90 mm
Na levé straně od kotouče	šířka: 145 mm
	hloubka: 500 mm
	výška: 250 mm
Na pravé straně od kotouče	šířka: 75 mm
	hloubka: 210 mm
	výška: 250 mm
Boční otvor pro vyčnívající obrobky	levá strana: 103 x 95 mm
	pravá strana: 25 x 25 mm



Obr. 19 Manuální stolní metalograf. rozbrušovací pila Labotom-3

3.2.4 Profiloměr

Měření drsnosti a profilu povrchu bylo provedeno na profiloměru Mahr XCR 20 s posuvovou jednotkou Perthometer PGK a snímačem MFW - 250 (obr. 20) umístěného v klimatizované laboratoři metrologie na ČVUT v Praze. Z více než 100 parametrů drsnosti, vlnitosti, P - profilu a Motif byly vybrány pouze parametry R_a a R_z na základě požadavků průmyslových partnerů.



Obr. 20 Profiloměr Mahr XCR 20

3.2.5 Metalografický lis

Nařezané segmenty z kroužků, které byly určeny pro měření tvrdosti a pozorování struktury, se poté zalisovaly za tepla na metalografickém lisu CitoPress - 10 značky Struers (obr. 21). Ten se nachází v metalografické laboratoři na ČVUT v Praze. Základní technické parametry jsou v tabulce 8.

Tab. 8 Technická data metalografického lisu CitoPress - 10 [35]

Montážní jednotka			
Montáž průměr		25, 30, 40, 50 mm, 1¼ ", 1½"	
Počet montážních celků		1	
Montážní lis			
Tlak	50 - 350 bar (krok 25 bar)	Rychlost ochlazování	vysoká: plný průtok
Doba ohřevu	1 - 15 min. (krok 0,5 min.)		střední: 20% plného průtoku
Výhřevná teplota	80 - 180 °C (krok 5 °C)		nízká: 3% plného průtoku
Doba chlazení	1 - 15 min. (krok 0,5 min.)	Max. výkon ohřevu	1300 W



Obr. 21 metalografický lis
CitoPress – 10



Obr. 22 Hotový metalografický
vzorek

Byla použita hmota DuroFast (černá), která se zvolila s ohledem na maximální schopnost udržení ostrých hran při broušení a leštění metalografických výbrusů. Dále byla aplikována hmota ClaroFast (průhledná), která sloužila k zalisování štítku s označením vzorku. Výsledný metalografický vzorek měl průměr 30 mm a výšku přibližně 15 mm (obr. 22).

3.2.6 Mechanický preparační systém

K výbrusu jednotlivých metalografických vzorků byl použit mechanický preparační systém Tegramin 25 značky Struers (obr. 23), který se nachází v metalografické laboratoři na ČVUT v Praze. Základní technické parametry jsou v tabulce 9.

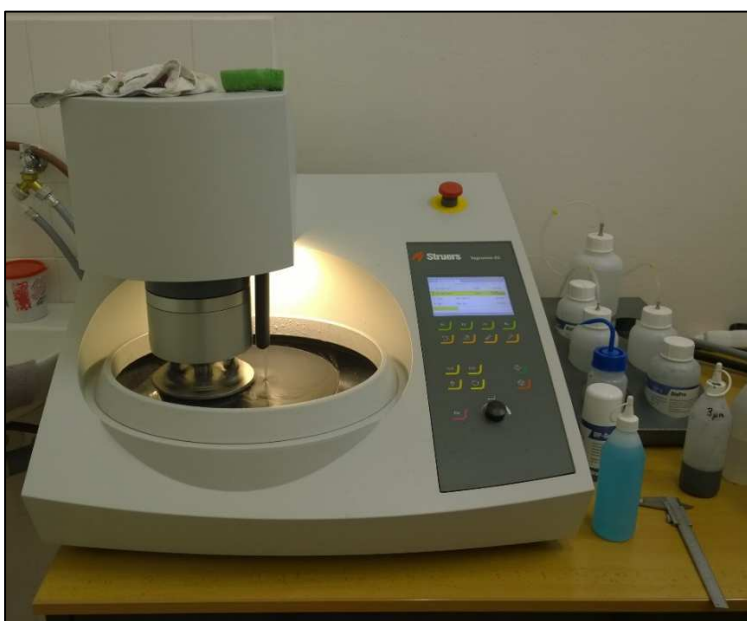
Vzorky byly odbroušeny cca o 0,2 - 0,5 mm (obr. 24). Hloubka byla volena tak, aby bylo možno provést měření tvrdosti v požadovaném rozsahu hloubky a hodnoty vynést do grafu. Výsledný povrch byl kovově lesklý.

Pro leštění byly použity brousicí a lešticí materiály značky STRUERS:

- brousicí plátno - grit 320,
- lešticí kotouč MD Largo + emulze MD Lupo + diamant ve spreji 9 μm ,
- lešticí kotouč (rovinný) MD Dac + diamant ve spreji 3 μm .

Tab. 9 *Technická data* mechanického preparačního systému [36]

Kotouč		Hlava	
Průměr	250 mm	Rychlost	50 - 150 ot/min (krok 10)
Rychlost	40 - 600 ot/min (krok 10)	Směr otáčení	ve směru / proti směru hod. ručiček
Směr otáčení	proti směru hodinových ručiček	Přítlačná síla na vzorek	5 - 50 N
Výkon motoru kontinuální / max.	750 W / 1125 W	Motor	120 W



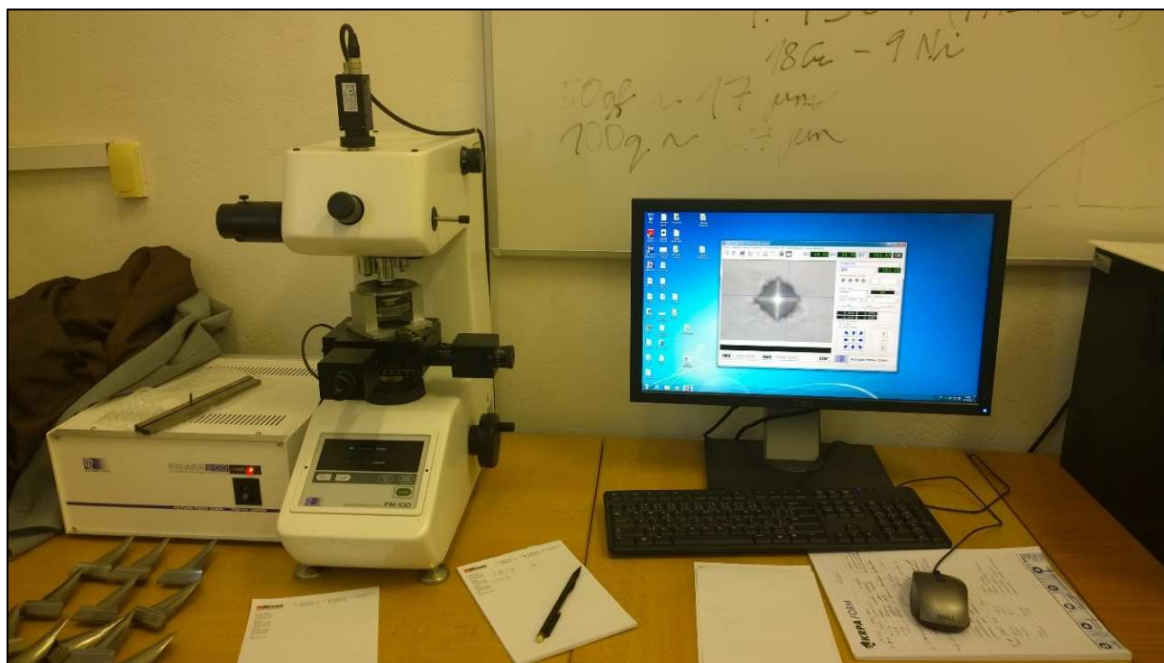
Obr. 23 Mechanický preparační systém Tegramin 25



Obr. 24 Vybroušený vzorek

3.2.7 Mikrotvrdoměr

Měření mikrotvrdosti podle Vickerse proběhlo na moderním zařízení FUTURE - TECH FM100 (obr. 25) s plně automatickým systémem zatěžování, pohonů, měření polohy, CCD kamerou a odečtem vpichu. Vyhodnocení zajišťoval program HDPS - ARS v počítači, který byl s mikrotvrdoměrem propojen. Tato soustava je umístěna v metalografické laboratoři na ČVUT v Praze.



Obr. 25 Mikrotvrdoměr FUTURE-TECH FM100 s PC

3.2.8 Elektrolytická leštička

K naleptání struktury austenitické oceli byla použita neoriginální elektrolytická leštička (obr. 26) nacházející se v metalografické laboratoři na ČVUT v Praze. Jako elektrolyt byl zvolen roztok kyseliny šťavelové o koncentraci 10%.



Obr. 26 Elektrolytická leštička

3.2.9 Leptadlo BERAHA I

Pro naleptání struktury duplexní oceli bylo použito leptadlo BERAHA I, které se skládá z 24 g hydrogendifluoridu amonného (NH_4FHF), 200 ml kyseliny chlorovodíkové (HCl) a 1000 ml destilované vody. Před leptáním se do 100 ml základního roztoku přidal 1 g disiřičitanu draselného ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$).

Martenzit se po naleptání zbarvil do modra.

3.2.10 Metalografický světelný mikroskop

K pozorování naleptané struktury byl použit starší metalografický světelný mikroskop Carl Zeiss Neophot 2 (obr. 27) umístěný v metalografické laboratoři na ČVUT v Praze. Metalografický mikroskop pro pozorování v rozsahu zvětšení 50 - 2000x je doplněný o výstup k připojení fotoaparátu, který se dále propojí s počítačem a pomocí příslušného programu se dá jednak pozorovat struktura na monitoru a zároveň vytvořit záznam v podobě fotografie. Pomocí dalšího programu se k fotografii doplní příslušné měřítko a označení.



Obr. 27 Metalografický světelný mikroskop Carl Zeiss Neophot 2

3.2.11 Elektrolytická leštička Struers

Odleptávání jednotlivých vrstev materiálu při měření gradientu napětí se provádělo na elektrolytické leštičce LectroPol - 5 značky Struers. Leštička se skládá ze dvou jednotek tj. ovládací (obr. 28) a lešticí (obr. 29). Je umístěna v laboratoři strukturní rentgenografie na ČVUT v Praze.

K odleptávání jednotlivých ocelí byly použity následující elektrolyty rovněž od firmy Struers:

- AC-2 pro austenitickou ocel (AISI 304),
- A2 pro duplexní ocel (AISI 318 LN).

Vyhovující napětí pro austenitickou respektive duplexní ocel bylo 20 V respektive 25 V, při čemž proud byl nastavován ovládací jednotkou.



Obr. 28 Ovládací jednotka elektrolyt. leštičky (EL)



Obr. 29 Leptací jednotka EL

3.2.12 Číselníkový úchylkoměr

Hloubka odleptání byla měřena pomocí číselníkového úchylkoměru ČSN 25 1816 značky Somet (obr. 30), který byl polohován rameny stojánku. Tento úchylkoměr je součástí laboratoře strukturní rentgenografie na ČVUT v Praze. Základní parametry jsou:

- měřicí rozsah: 0 - 1 mm,
- rozlišení: 1 μm .



Obr. 30 Číselníkový úchylkoměr

3.2.13 Difraktometr

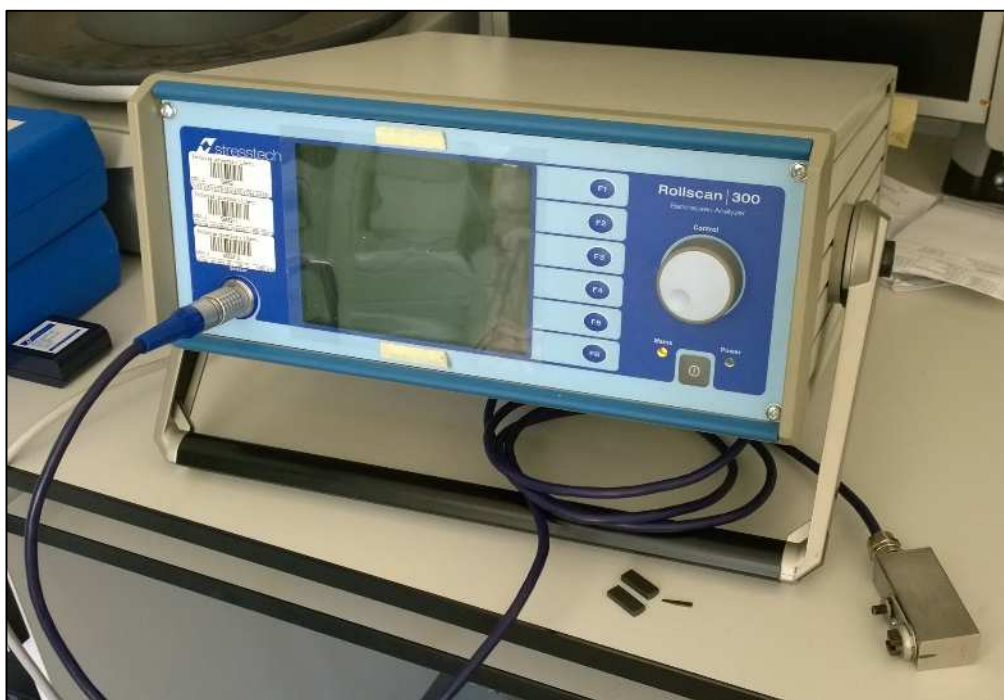
Difrakční měření byla prováděna na θ - θ goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical (obr. 31) umístěným v Laboratoři strukturní rentgenografie na ČVUT v Praze. S pomocí příslušného programu X'Stress a daných materiálových konstant, byly vypočteny zbytková napětí ve směru axiálním a tečném.

3.2.14 Magnetoelastický analyzátor

K magnetoelastické analýze Barkhausenova šumu byl použit magnetoelastický analyzátor Stresstech Rollscan 300 (obr. 32) umístěný v laboratoři KOM na TU v Liberci. Pro měření magnetoelastického parametru m_p , který odpovídá intenzitě Barkhausenova šumu (tzv. nespojité magnetizaci), byl použit standardní senzor.



Obr. 31 Difraktometr X'Pert PRO MPD



Obr. 32 Magnetoelastický analyzátor Stresstech Rollscan 300

3.3 Řezné podmínky

V tabulce 10 je uvedeno pořadí soustružených úseků, označení trubky, označení příslušného úseku (počáteční písmeno G resp. D značí austenitickou resp. duplexní ocel), utvařeč, kterým se rozlišují jednotlivé VBD a následně úhel čela VBD upevněné v držáku. V posledních třech sloupcích jsou uvedeny jednotné řezné podmínky při soustružení, které byly zvoleny průmyslovým partnerem.

Tab. 10 Řezné podmínky při soustružení

Pořadí	Trubka	Označení	Utvařeč	*Úhel čela [°]	v_c [m/min]	f_{ot} [mm/ot]	a_p [mm]
1	A	GA1	**F3M	- 6	140	0,14	2
2	A	GA2	SF	12			
3	A	GA3	NF	- 2			
4	B	GB1	PP	7			
5	B	GB2	**F3M	- 6			
6	B	GB3	SF	12			
7	C	GC1	NF	- 2			
8	C	GC2	PP	7			
9	C	GC3	**F3M	- 6			
10	D	GD1	SF	12			
11	D	GD2	NF	- 2			
12	D	GD3	PP	7			
1	A	DA1	**F3M	- 6	140	0,14	2
2	A	DA2	SF	12			
3	A	DA3	NF	- 2			
4	B	DB1	PP	7			
5	B	DB2	**F3M	- 6			
6	B	DB3	SF	12			
7	C	DC1	NF	- 2			
8	C	DC2	PP	7			
9	C	DC3	**F3M	- 6			
10	D	DD1	SF	12			
11	D	DD2	NF	- 2			
12	D	DD3	PP	7			

* Úhly čela znázorněné v tabulce jsou výsledkem po odečtení úhlu - 6° z držáku destiček ISCAR DCLNL - 2020K - 12

** Úhel čela utvařeče destiček F3M je zatím neznámý, dle prodejce se úhel čela díky utvařeči v závislosti na hloubce řezu mění. Na základě studia tvaru destičky pomocí optického mikroskopu a konzultace s prodejcem se předpokládá, že tento úhel čela destičky F3M je na její špičce, jež je důležitá pro tvorbu výsledného povrchu 0°. Po odečtení - 6° z držáku destičky, je výsledný úhel čela cca - 6°.

3.4 Metodika experimentu

K experimentu byly použity dva druhy bezešvých trubek o průměru 101,6 x 8,08 mm s jakostí

- AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel,
- AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel.

Od každé jakosti byly užity 4 segmenty délky 200 mm, jejichž délka byla volena s ohledem na upínání do sklíčidla za vnější průměr a tuhost při obrábění. Trubky byly před samotným experimentem vyžihány k částečnému odstranění zbytkových napětí z polotovaru.

Obrábění probíhalo na moderním soustružnickém centru OKUMA Genos za intenzivního tlakového přívodu řezné kapaliny a následujících řezných podmínek:

- řezná rychlost $v_c = 140$ m/min,
- posuv $f_{ot} = 0,14$ mm/ot,
- hloubka řezu $a_p = 2$ mm.

Byly použity 3 držáky vyměnitelných břitových destiček stejného typu

- ISCAR DCLNL - 2020K - 12.

Dále byly aplikovány 2 VBD od čtyř téměř stejných typů VBD s označením

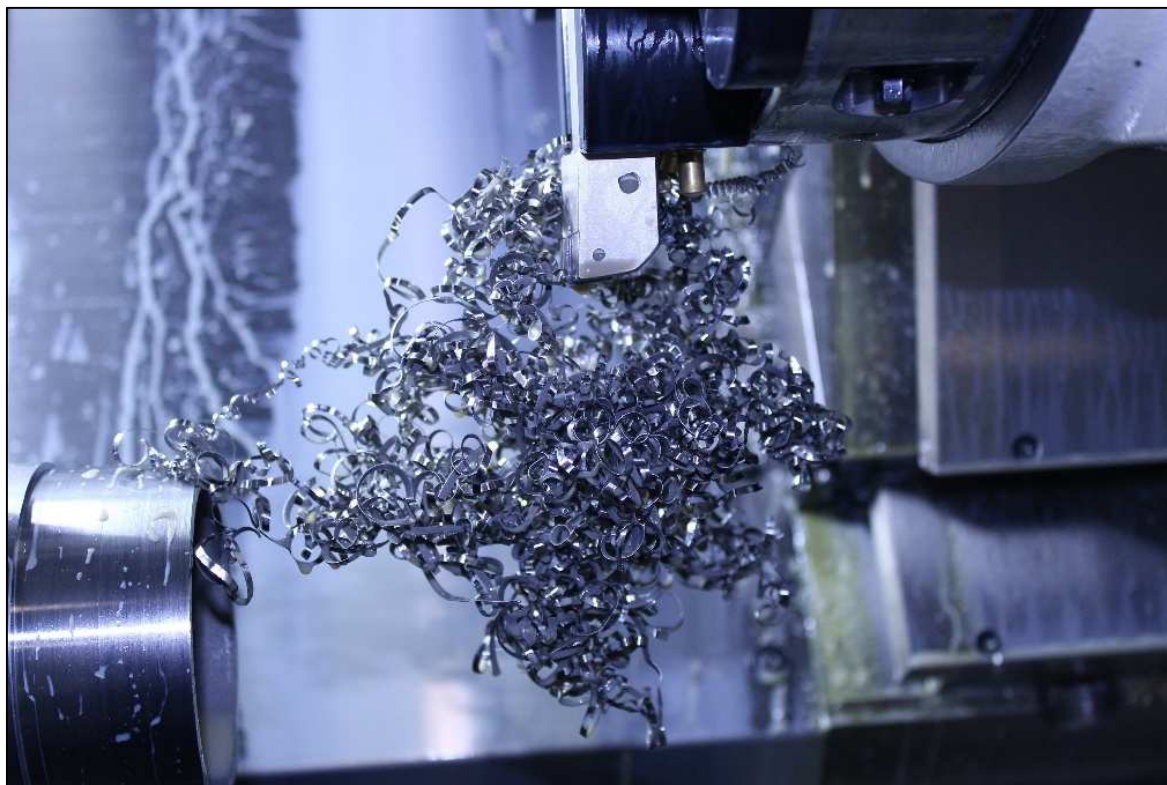
- ISCAR CNMG 120404 - SF (+ 12 °),
- ISCAR CNMG 120404 - PP (+ 7 °),
- ISCAR CNMG 120404 - NF (- 2 °),
- ISCAR CNMG 120404 - F3M (- 6 °).

VBD se od sebe lišily pouze utvařečem třísek, který představuje proměnlivou geometrii břitu. Geometrie utvařeče pro naše experimenty při daných podmínkách představuje úhel čela v rovině ortogonální γ_o . V závorce je uveden úhel sklonu čela VBD v kombinaci s držákem.

Trubky byly obráběny na jedno upnutí. Na každé trubce byly soustruženy 3 úseky po 20 mm. Každý úsek byl obráběn soustružnickým nožem s různou VBD dle tabulky 10 v podkapitole 3.3. Tato analytická metoda DOE (metoda plánovaných experimentů) byla volena z důvodu odstranění možného ovlivnění výsledků jednotlivou trubkou. VBD byla vždy nová pro eliminaci možného otupení a všechny měly poloměr špičky 0,4 mm.

Samotný postup byl následující. Nejdříve se upnula první trubka do sklíčidla, dále se do zásobníku upevnilly soustružnické nože s příslušnými VBD.

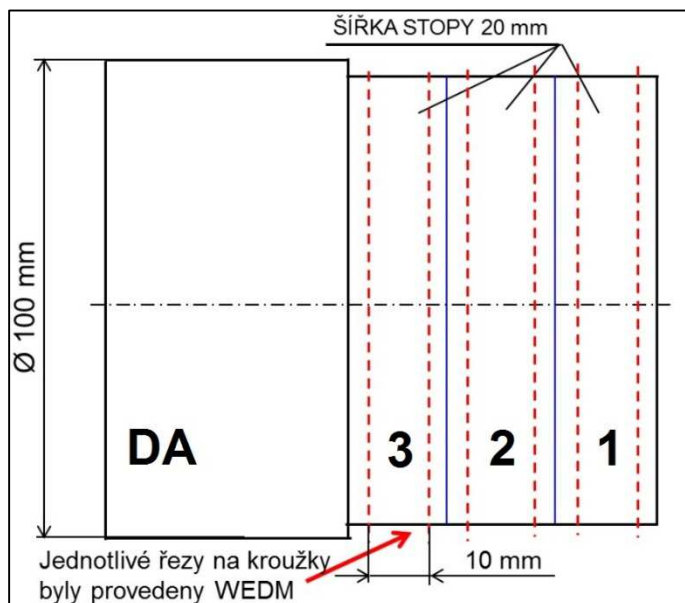
Poté se do programu zadaly rozměry obrobku, řezné podmínky, pozice soustružnických nožů a délka obráběného úseku jednotlivými noži. Spustil se program a proces byl za několik desítek vteřin hotov (obr. 33). Po proběhnuté operaci se vyměnila trubka, VBD v jednotlivých soustružnických držácích a program se spustil znovu. Takto se postupovalo i se zbylými trubkami.



Obr. 33 Prostor z místa po obrábění

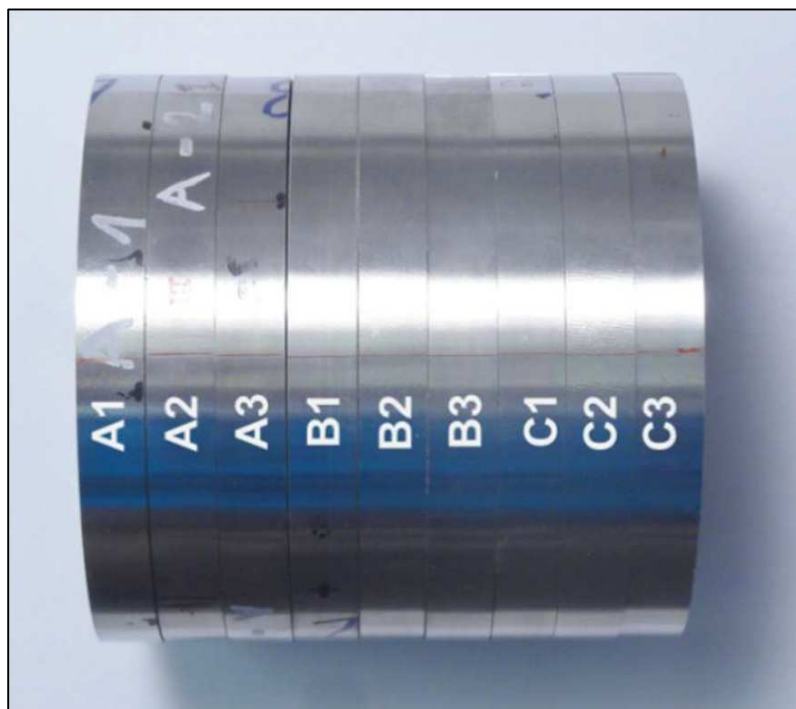
Následně byly z trubek vyřezány technologií WEDM kroužky o šířce 10 mm externí firmou.

Postup řezání byl následující: 0 souřadnice představuje (± 1 mm) kraj trubky (= kraj úseku číslo 1). Řezy vedly v souřadnicích 5 mm, 15 mm, 25 mm, 35 mm, 45 mm, 55 mm. Znázorněno na trubce DA (obr. 34).



Obr. 34 Schéma principu řezání jednotlivých trubek

Na vyřezaných kroužcích (obr. 35) byly dále prováděny analytické činnosti, které jsou uvedeny v následujících podkapitolách.



Obr. 35 Část vyřezaných kroužků metodou WEDM

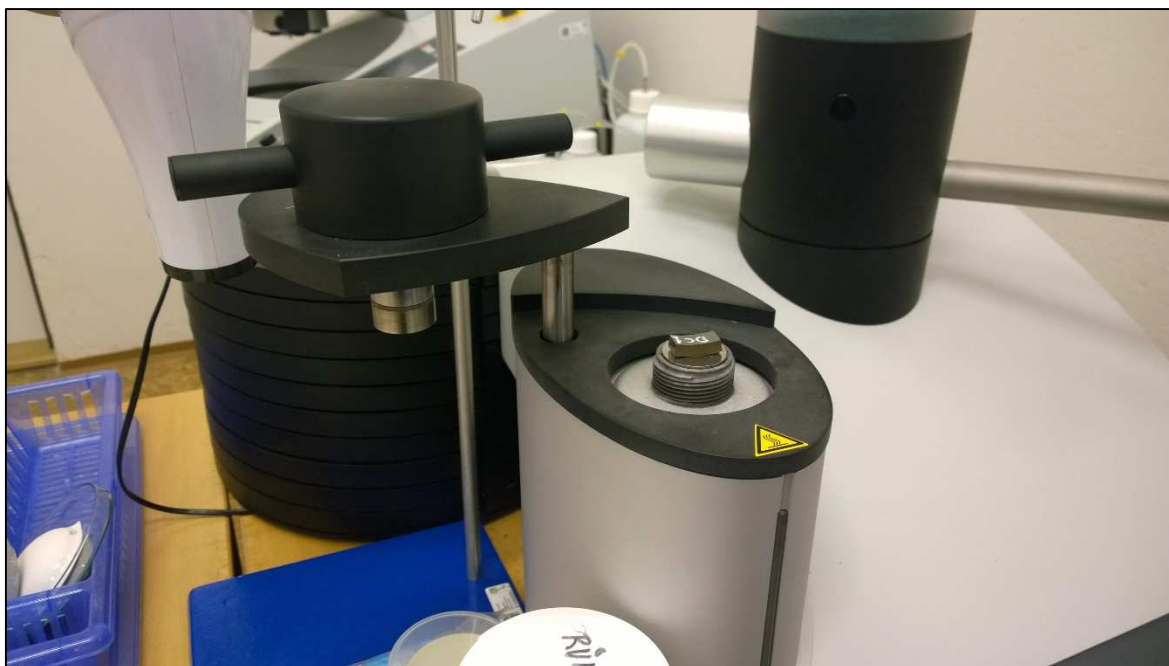
3.5 Metodika měření

Dělení vzorků

Kroužky nařezané metodou WEDM se dále nadělily po 45° na metalografické rozbrušovací pile při intenzivním přívodu procesní kapaliny. Zapotřebí byly 4 segmenty z každého kroužku a zbylá polovina se použila pro měření parametrů drsnosti a popřípadě se nechala jako záloha pro případná další měření. Jeden segment byl zapotřebí pro měření drsnosti, jeden segment byl použit k měření tvrdosti a pozorování struktury a dva segmenty byly udělány pro stanovení zbytkových napětí (povrchové makroskopické zbytkové napětí, gradient makroskopických zbytkových napětí) a k měření magnetoelastického parametru.

Zalisování vzorků

Segmenty na měření drsnosti a stanovení zbytkových napětí byly již připraveny na měření. Se segmentem pro měření tvrdosti a poté struktury se provedly následující operace z důvodu lepší manipulace a celkové práce se vzorkem. Nejdříve se segment ještě zmenšil na metalografické rozbrušovací pile na takovou délku, aby se vešel do 30 mm válce metalografického lisu (obr. 36).



Obr. 36 Vzorek umístěný na píst metalografického lisu

Segment se na píst položil vnější obráběnou hranou a spustil se do válce. Zde se úplně zasypal hmotou DuroFast, která je po tepelném zalisování velmi tvrdá a drží ostré hrany vzorku při broušení. Na tuto hmotu ještě před zalisováním byl usazen identifikační štítek, jenž byl zasypán hmotou ClaroFast, která je po zalisování průhledná. Válec se uzavřel protikusem s druhým pístem a spustil se příslušný program vybraný podle použitých hmot.

Podmínky procesu lisování:

- délka procesu: 6 minut (4 min. ohřev + 2 min. chlazení),
- teplota ohřevu: 180 °C,
- lisovací tlak: 300 Bar.

Výsledkem byl metalografický vzorek „puk“ o průměru 30 mm a výšce přibližně 15 mm.

Zvolení hloubky výbrusu a zatížení vnikacího indentoru

Hloubka výbrusů byla volena po pomocných měřeních tvrdosti na odřezcích, které vznikly při snižování délky segmentů pro zalisování. Měření byla provedena kolmo k řezu vzniklého na metalografické rozbrušovací pile. Bylo vybráno celkem 8 odřezků, které se zrodily při soustružení austenitu a duplexu s úhly čela: + 12°, + 7°, - 2°, - 6°. Tyto odřezky se obdobně zalisovaly a nechaly

vybrousit do kovového lesku jako ostatní vzorky (popsáno v následující části - broušení). Na těchto zalisovaných odřezcích se změnila tvrdost v závislosti na hloubce.

Nejdříve se vytvořil zkušební vpich přibližně ve středu plochy vzorku, abychom dosáhly minimální úhlopříčky vtisku, která je podle normy 0,02 mm. Pro austenitickou ocel vyšlo zatížení 50 g a pro duplexní ocel 100 g. Doba zatížení byla zvolena 12 s v souladu s normou.

První vzdálenost zkoušky tvrdosti proběhla 0,11 mm od okraje soustruženého povrchu z důvodu dodržení 2,5 násobku úhlopříčky vtisku dle normy ČSN EN ISO 6507 - 1. Další krok byl po 0,11 mm (minimální rozestup vpichů 4 x úhlopříčka vpichu - v našem případě cca 0,023 mm) až do 1,65 mm pod soustruženým povrchem. V každé hloubce proběhlo 5 opakování měření (matice o rozměrech 15 x 5). Z výsledků bylo patrné, že zpevnění je přibližně až do hloubky 0,5 mm pro austenitickou ocel a do 0,2 mm pro duplexní ocel. Na základě těchto výsledků byly vypočítány délky tětív, které odpovídají odbroušeným hloubkám vzorků kolmo na soustružený povrch. Délky tětív jsou přibližně 9 mm pro hloubku 0,2 mm a 15 mm pro hloubku 0,5 mm.

Broušení

Broušení vzorků bylo provedeno na mechanickém preparačním systému. Nejdříve se do otočné hlavy přístroje vložil příslušný držák na vzorky průměru 30 mm. Ten pojmul 6 vzorků najednou.

Po přípravě zařízení bylo vloženo brousící plátno s hrubostí 320 a samotné vzorky. Zapnul se příslušný program na přístroji, který spustil broušení a přívod vody. Vzájemný pohyb vzorku a kotouče byl planetový. Po pár desítkách sekund se program přerušil a změnila se délka tětivy. Tento čas závisel na opotřebením brousícího kotouče. Po odbroušení všech vzorků do požadované hloubky, která odpovídala délce tětivy přibližně 9 mm, se program zastavil. Tato fáze broušení se provedla se všemi zbývajících vzorky.

Všechny vzorky, držák vzorků a brusný kotouč se opláchly, aby se nekontaminovaly následující lešticí kotouče.

Vložil se lešticí kotouč MD Largo, držák vzorků, vzorky a zapnul se příslušný program, který spustil leštění a přívod lubrikantu na alkoholové bázi. Ihned následovalo manuální rovnoměrné nastříkání 9 µm diamantové suspenze

ze spreje na kotouč. Tento proces trval 3 minuty a opakoval se na všech zbývajících vzorcích. Poté se všechny vzorky opláchly.

Poslední fáze byla velmi podobná jako předchozí popsaná. Vložil se lešticí kotouč MD Dac, držák vzorků, vzorky a zapnul se příslušný program, který spustil leštění a přívod lubrikantu. Následovalo okamžité manuální rovnoměrné nastříkání 3 µm diamantové suspenze ze spreje na kotouč. Tento proces trval 4 minuty. Výsledkem byl kovově lesklý povrch. Po dokončení zbývajících vzorků, byla práce na mechanickém preparačním systému u konce. Vzorky se ještě očistily technickým lihem a byly připraveny na měření mikrotvrdomosti a pozorování struktury.

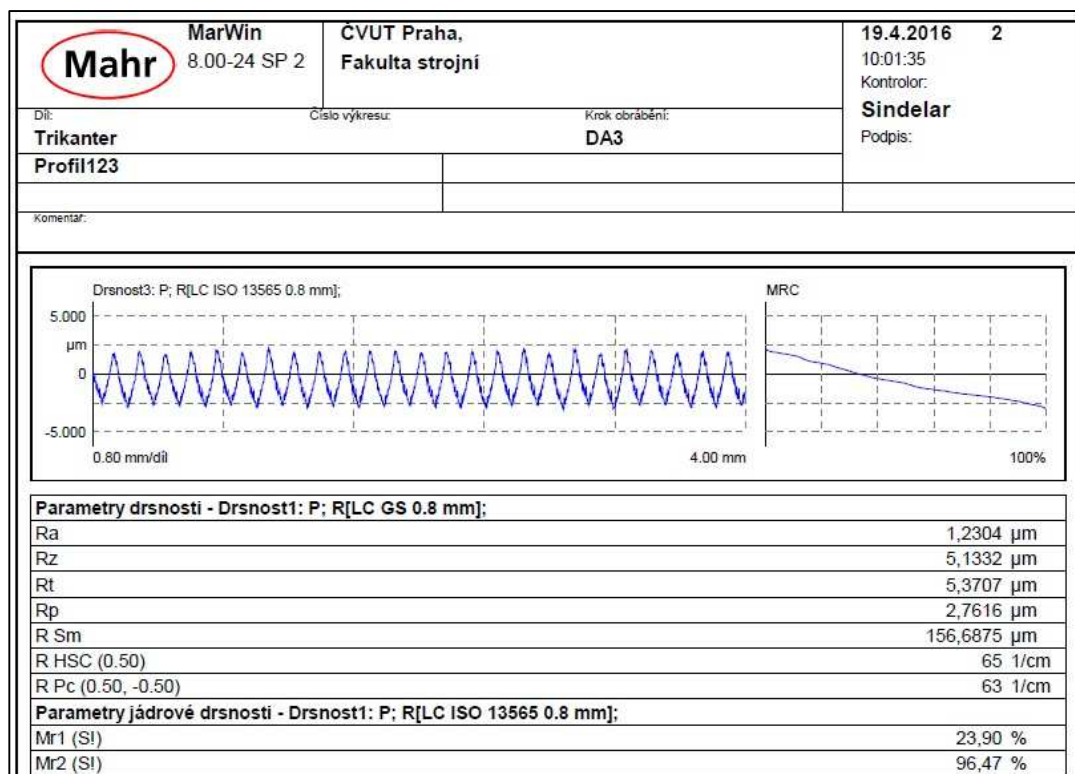
Přičemž vzorky z austenitické a 4 vzorky z duplexní oceli (4 druhy utvařečů) se pro kompletní závislost tvrdosti na hloubce po zkouškách mikrotvrdomosti přebrousily na délku tětiny 15 mm a měření se opakovalo.

3.5.1 Měření drsnosti

Měření drsnosti proběhlo na profiloměru Mahr XCR 20 s posuvovou jednotkou Perthometer PGK a snímačem MFW - 250. Profiloměr disponuje ještě jednou posuvovou jednotkou MarSurf PCV se snímacím raménkem, která se odebrala z důvodu možné kolize s měřeným vzorkem. Potom se posuvová jednotka, se kterou se následně měřilo, dala do měřicí polohy.

Postup měření byl následující. Po zapnutí zařízení se v programu nastavily parametry měření, tj. posuvová jednotka, snímač, měřená délka, měřené parametry, rychlost měření a další parametry, které byly nastaveny podle normy ČSN EN ISO 4287. Snímaná délka byla 5,6 mm. Délka se skládala z měřené délky 4 mm, z rozběhu 0,8 mm a doběhu 0,8 mm. Pak se vhodně polohoval malý stůl se svěrákem, do kterého se upnul měřený vzorek, tj. polovina kroužku. Kroužek se měřil na 5 místech rozložených přibližně po 45°.

Výsledkem byl protokol (obr. 37) se všemi zadanými hodnotami a profilem měřeného povrchu.



Obr. 37 Část protokolu drsnosti

3.5.2 Měření tvrdosti

Měření mikrotvrdomosti podle Vickerse bylo realizováno na mikrotvrdoměru FUTURE - TECH FM100 s odečtem vpichu podle normy ČSN EN ISO 6507 - 1.

Provedení měření profilu mikrotvrdomosti není z pohledu zajištění vzdáleností mezi vpichy a kraji možné na příčném výbrusu. Z tohoto důvodu bylo zvoleno zhotovení na jedné, případně dvou třetivách (kratší 9 mm a delší 15 mm - cca). Následně byly zjištěné body v jednotlivých hloubkách použity pro vynesení jednotlivých průběhů mikrotvrdomosti. Na každý metalografický vzorek připadalo 75 (15 hladin) až 150 (2 x 15 hladin) vpichů. Na každé hladině bylo měření replikováno 5ti vpichy.

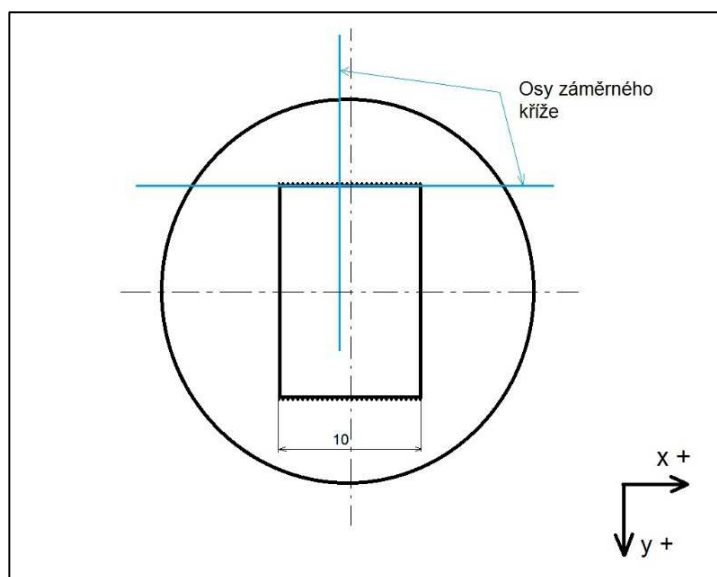
Princip měření byl následující. Zapnuly se přístroje a počítač, ve kterém se spustil příslušný program pro ovládání mikrotvrdoměru a vyhodnocování tvrdosti. Manuálně se na mikrotvrdoměru nastavila hodnota zatížení, která byla určena pomocným měřením (viz podkapitola 3.5):

- 50 g pro austenitickou ocel,
- 100 g pro duplexní ocel.

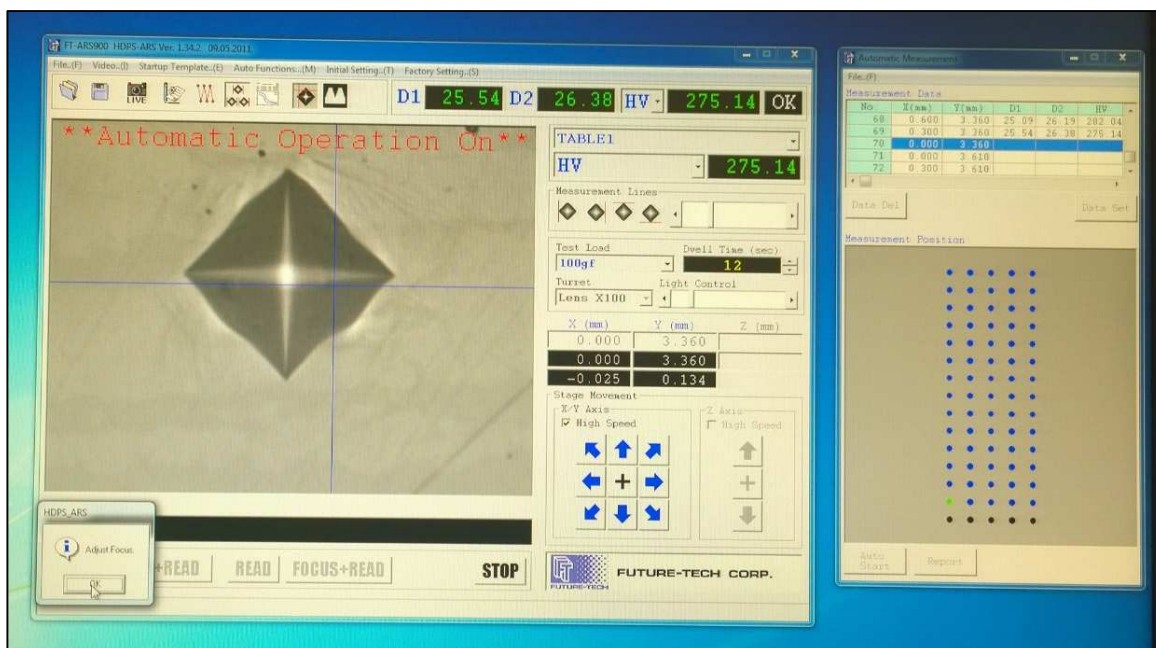
Pomocí programu se zvolil objektiv se zvětšením 10x a zapnula se funkce záměrný kříž. Do připraveného přípravku se vložil první vzorek (obr. 38). S pomocí záměrného kříže a kamery, jejíž obraz se promítal v přítomném čase v programu na monitoru, se vzorek manuálně polohoval tak, aby jeho hrana byla rovnoběžná s osou x posuvu stolku. Bylo nutné manuálně doostřovat obraz. Následně se pomocí elektrického posuvu najelo středem záměrného kříže do bodu, který byl na hraně mezi pryskyřicí a součástí ve směru y a ve směru x přibližně 5 mm od kraje vzorku (obr. 39). Zde se vynulovaly souřadnice a nastavila se matice měření. Ta měla krok v ose $x = 0,3$ mm a v ose $y = 0,25$ mm. U vzorku s délkou tětiny 9 mm začínala matice v ose x se souřadnicí 0,00 mm a y se souřadnicí 0,11 mm. U vzorku s délkou tětiny 15 mm začínala matice v ose x se souřadnicí 0,00 mm a y se souřadnicí 1,40 mm. Počet kroků v souřadnici x bylo 5 a v souřadnici y 15 pro pokrytí potřebné plochy pro průběh mikrotvrdosti. Poté se nastavil objektiv se zvětšením 100x pro pozdější automatické dobré odečítání velikostí úhlopříček. V programu se zaškrtnulo použité zatížení a délka zatížení, která byla v našem případě 12 vteřin. Ukázka prostředí programu v obrázku 40.



Obr. 38 Vzorek v přípravku na mikrotvrdoměru



Obr. 39 Počáteční poloha měření



Obr. 40 Prostředí měřicího programu na mikrotvrdoměru

Spustilo se měření a přístroj udělal příslušných 75 vpichů. Délka měření byla přibližně 40 minut. Program automaticky najel na první vtisk, kde bylo za úkol manuálně doostřit obraz a odklepnout tlačítko pro automatické odečtení délek úhlopříček. Takto se vždy změřilo všech 75 vpichů na příslušném vzorku. V případě chyby automatického odečtu byla v programu manuálně opravena délka úhlopříček. Vygenerovaly se hodnoty do textového dokumentu, odkud se přkopírovaly do excelu, kde byl proveden příslušný přepočet na skutečnou hloubku vpichu. Vygenerované hodnoty obsahovaly: číslo měření, délky úhlopříček, jejich průměr, souřadnice vpichů, tvrdost a zatížení. Z výsledných hodnot se vytvořily grafy, které se hodnotily.

Takto se postupovalo se všemi vzorky.

3.5.3 Zkoumání struktury

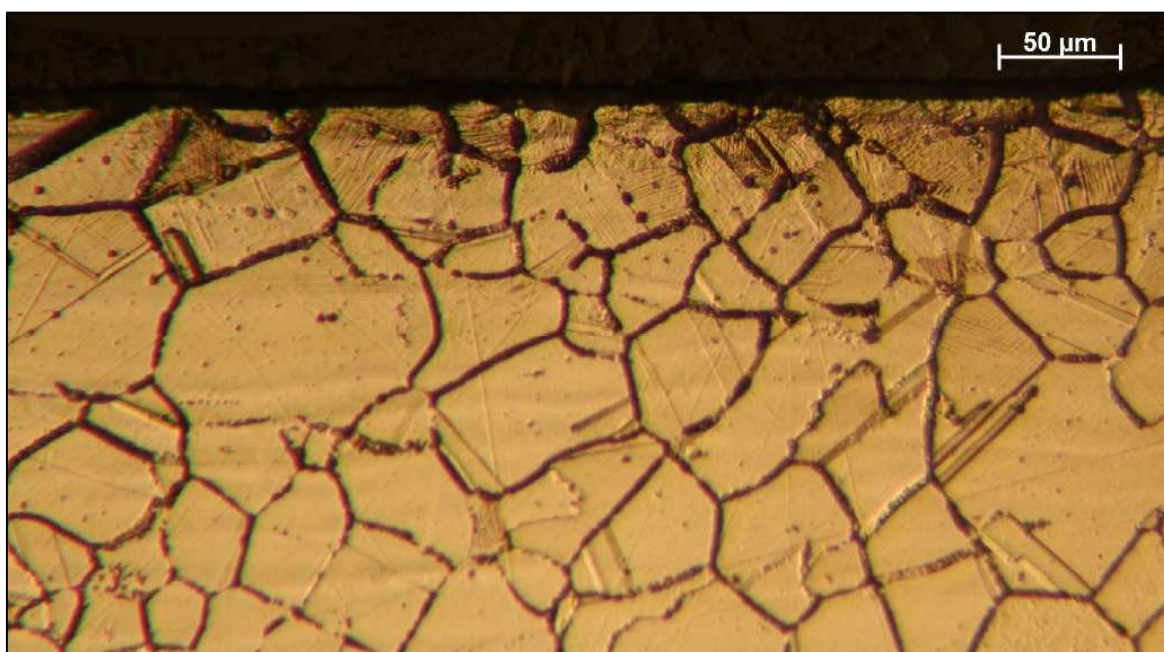
Vzorky byly zkoumány pouze v leptaném stavu, jelikož studium čistoty materiálu a vnitřních vad nebylo ovlivnitelné parametry experimentu. Pozorování proběhlo na mikroskopu *Carl Zeiss Neophot 2* při šikmém osvětlení ve zvětšení 400x.

AISI 304 (EN 1.4301) – austenitická ocel

Austenitické nerezové oceli se obecně obtížně leptají chemickou cestou, jelikož mají tendence k nehomogennímu leptání. Tento jev se vyskytuje zejména na hranách mezi pryskyřicí metalografického výbrusu a objektem zkoumání.

Z tohoto důvodu bylo zvoleno elektrolytické leptání dotykem elektrody ve vodném roztoku (elektrolytu) kyseliny šťavelové (koncentrace 10%). Vzorek příčného řezu byl zapojen jako anoda. Vyhovující napětí se pohybovalo v rozsahu 15 až 20 V. Proud byl zajištěn napěťovou stabilizací zdroje. Elektrolytické leptání probíhalo přibližně 20 vteřin.

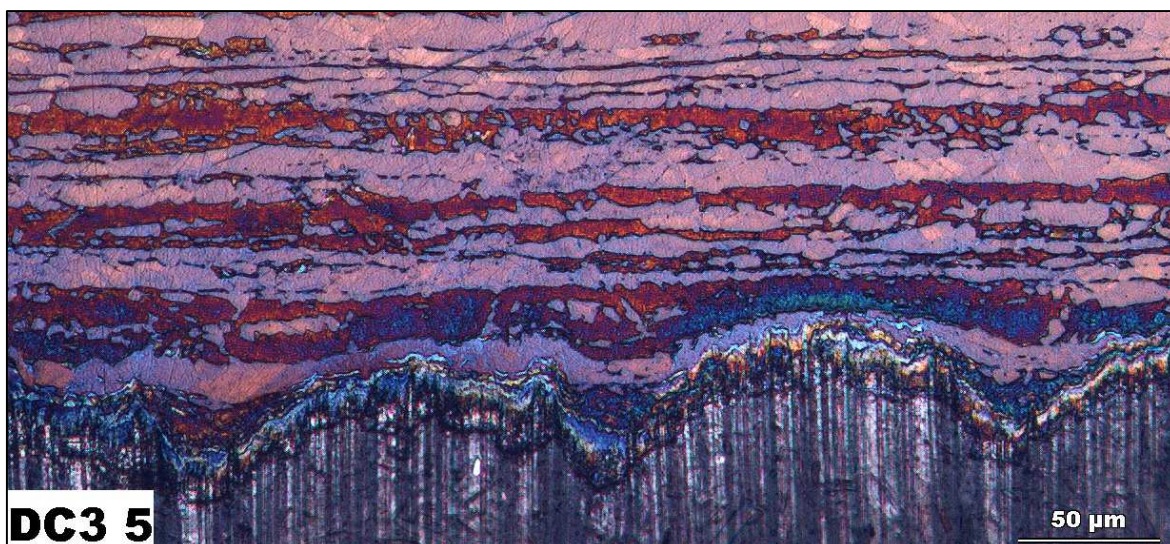
Po vložení naleptaného vzorku do mikroskopu, zapnutí zdroje světla a doostření byla v mikroskopu vidět následující struktura (obr. 41).



Obr. 41 Ukázka struktury austenitické oceli

AISI 318 LN (EN 1.4462) – duplexní ocel

Leptání k vyvolání struktury duplexní oceli probíhalo v leptadlu Beraha I několik minut, než došlo k viditelnému zbarvení vzorku. Vzorek použitý na měření mikrotvrdomosti se vložil do leptadla mokrá a po vyjmutí se opláchnul. Poté se vložil do mikroskopu, kde byla vidět následující struktura (obr. 42).



Obr. 42 Ukázka struktury duplexní oceli

3.5.4 Stanovení makroskopických zbytkových napětí

Difrakční měření byla prováděna na θ - θ goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical s následujícími parametry:

- rentgenka s manganovou, resp. chromovou anodou v případě měření austenitické, resp. feritické fáze,
- křížové clony o velikosti $2 \times 2 \text{ mm}^2$,
- β filtr (absorbující difraktované záření $\text{MnK}\beta$, resp. $\text{CrK}\beta$) z tenké chrom-berylnaté, resp. vanadové fólie umístěný před bodovým detektorem.

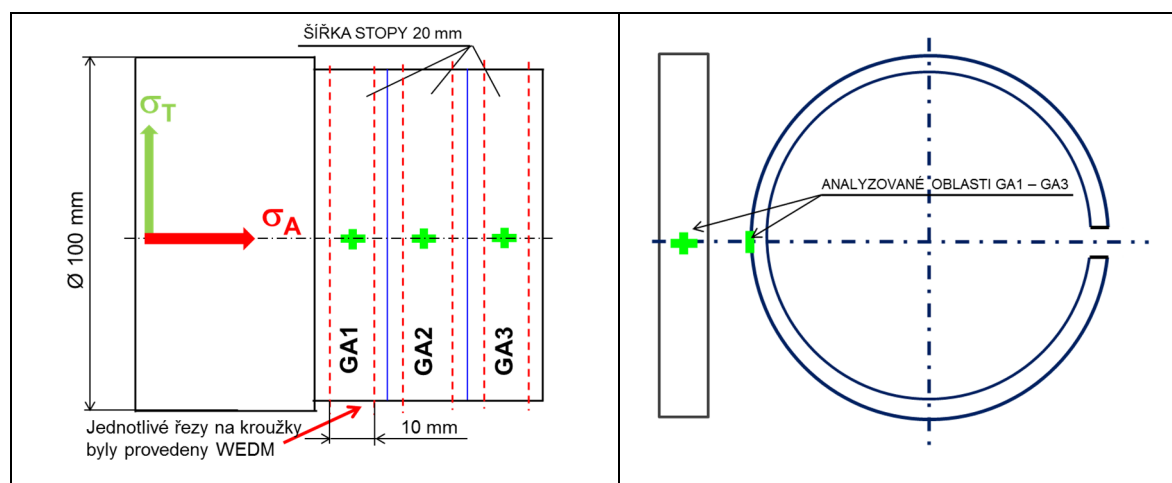
Parametry difrakčních experimentů byly:

- počáteční úhel pro γ -Fe $2\theta_p = 143^\circ$ a koncový úhel $2\theta_k = 161^\circ$,
- počáteční úhel pro α -Fe $2\theta_p = 148^\circ$ a koncový úhel $2\theta_k = 164^\circ$,
- velikost kroku $\Delta 2\theta = 0,5^\circ$ pro α -Fe $0,5^\circ$, přičemž byl zvolen kontinuální mód skenování úhlového intervalu,
- čas měření při každém kroku byl 8 sekund,
- měřeno při 9 náklonech úhlu ψ , tzn. 0; 0,15; ...0,6 pro kladné i záporné hodnoty úhlu ψ .

Byla analyzována difrakční linie $\{311\}$ fáze γ -Fe a $\{211\}$ fáze α -Fe. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$ za předpokladu dvojsového stavu zbytkové napjatosti (θ je difrakční úhel, ψ - úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Závislosti $2\theta^{311}(\sin^2\psi)$ a $2\theta^{211}(\sin^2\psi)$ byly

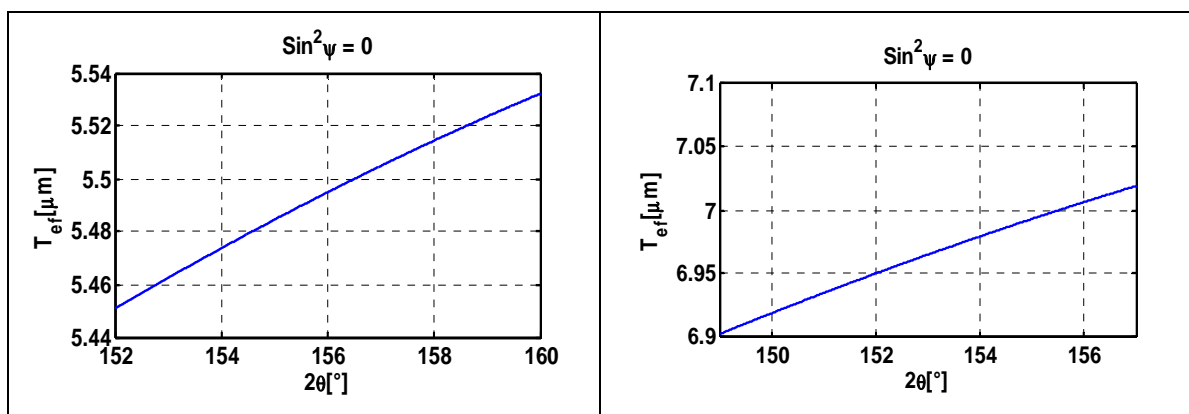
měřeny ve dvou azimutech σ_A a σ_T (obr. 43). Difrakční úhel 2θ byl určen z maxima difrakční linie mřížkových rovin dané fáze fitovaného funkcí Pearson VII. K rozlišení difraktovaného dubletu při vyšetřování obou fází bylo využito Rachingerovy metody. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 6,98 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,87 \text{ TPa}^{-1}$ pro $\gamma\text{-Fe}$ a $\frac{1}{2}s_2 = 5,76 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$ pro $\alpha\text{-Fe}$. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ”.

Pro polohování analyzovaných těles při jejich měření na difraktometru bylo využito triangulačního laserového zaměřování s $5 \mu\text{m}$ přesností stanovení polohy měřené oblasti povrchu vzorku vůči zdroji laserového svazku.



Obr. 43 Schématické znázornění analyzovaných oblastí vzorku trubky označené GA s vyznačenými směry měření

Velikost ozářeného objemu je dána povrchem ozářené oblasti a hloubkou vnikání rtg svazku do analyzovaného povrchu viz obrázek 44.



Obr. 44 Efektivní hloubka vnikání záření $\text{CrK}\alpha$ a $\text{MnK}\alpha$ do železa, kde efektivní hloubka vnikání T_{ef} je tloušťkou vrstvy, která difraktuje 63,2 % z celkové difraktované energie

3.5.5 Stanovení gradientů makroskopických zbytkových napětí

Měření gradientu makroskopických napětí probíhalo stejným způsobem jako v případě měření zbytkových napětí povrchu na θ - θ goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical. Toto měření je popsáno v předchozí podkapitole 3.5.4.

Aby se zjistil průběh zbytkových napětí v závislosti na hloubce, musely se jednotlivé vrstvy materiálu odleptávat a následně měřit.

Odleptávání jednotlivých vrstev se uskutečňovalo na elektrolytické leštičce LectroPol - 5 značky Struers a hloubka odleptání se měřila pomocí číselníkového úchylkoměru ČSN 25 1816 značky Somet. Pracovní prostředí je zobrazeno na obrázku 45, kde je vidět v levé části obrázku lešticí jednotka, uprostřed ovládací jednotka elektrolytické leštičky a v pravé části stojánek s číselníkovým úchylkoměrem.



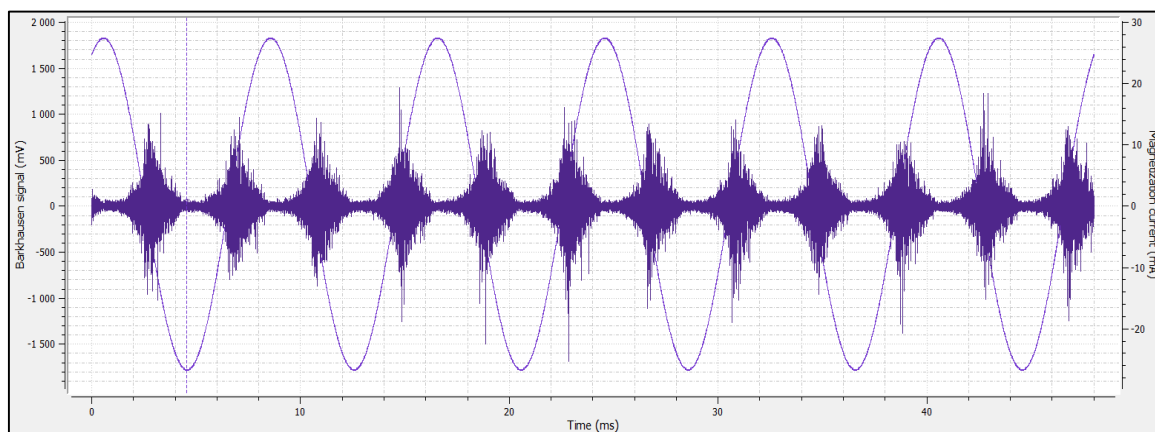
Obr. 45 Pracovní prostředí pro odleptávání

K odleptávání austenitické oceli (AISI 304) respektive duplexní oceli (AISI 318 LN) byl použit elektrolyt typu AC-2 resp. A2. Vyhovující napětí pro austenitickou resp. duplexní ocel bylo 20 V resp. 25 V, přičemž proud byl nastavován ovládací jednotkou pohybující se v řádech desetin až jednotek A. Čas odleptávání se lišil v závislosti na požadované hloubce úběru materiálu a to od desítek až po stovky vteřin.

Číselníkový úchylkoměr se polohoval tak, aby se po celou dobu měření odleptaných vrstev nemusel jinak nastavovat (měření začínalo v koncové části rozsahu měření). Dále se pomocí magnetických přípravků zajistila stejná poloha vzorků při opakovaných měřeních.

3.5.6 Měření magnetoleastického parametru

Vlastní měření bylo provedeno na magnetoelastickém analyzátoru Stresstech Rollscan 300. Pro měření magnetoleastického parametru mp , který odpovídá intenzitě Barkhausenova šumu (tzv. nespojité magnetizaci), byl použit standardní senzor. V rámci použité metody byl nastaven sinusový tvar magnetizačního signálu, magnetizační napětí 3,5 V pro austenitickou ocel respektive 4,5 V pro duplexní ocel a magnetizační frekvence 75 Hz respektive 125 Hz. Získané výsledky z jednotlivých analyzovaných míst jsou průměrnou hodnotou z 10 měření (obr. 47). Hloubka vnikání budicího signálu je závislá na použité frekvenci budicího signálu a na analyzovaném materiálu [37].



Obr. 47 Budicí sinusový signál a snímaný signál Barkhausenova šumu

3.6 Vyhodnocení výsledků

V této podkapitole je souhrn všech výsledků měření. Jedná se o: drsnost, strukturu materiálu, stupeň a hloubku zpevnění, zbytkové napětí v povrchové vrstvě, gradient makroskopických zbytkových napětí a hodnota magnetoelastického parametru.

3.6.1 Drsnost

Při měření drsnosti povrchu byly vybrány k porovnání pouze hodnoty R_a a R_z . Důvodem bylo, že z již zmíněných informací (podkapitola 2.1) úhel sklonu čela téměř neovlivňuje hodnoty drsnosti povrchu na rozdíl od rychlosti posuvu nebo poloměru špičky.

Výsledné hodnoty parametrů drsnosti pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v tabulce 11 a 12. Hodnoty jsou seřazeny dle druhu utvařeče (úhlu čela).

AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel

Tab. 11 Hodnoty parametrů drsnosti R_a a R_z na austenitické oceli

vzorek	utvařeč	úhel čela [°]	R_a [μm]	R_z [μm]	$\langle R_a \rangle \pm \Delta R_a$ [μm]	$\langle R_z \rangle \pm \Delta R_z$ [μm]
GA2	SF	+ 12	1,19	5,35	$1,33 \pm 0,13$	$5,67 \pm 0,29$
GB3	SF		1,30	5,61		
GD1	SF		1,49	6,05		
GB1	PP	+ 7	1,36	5,91	$1,22 \pm 0,11$	$5,50 \pm 0,36$
GC2	PP		1,20	5,54		
GD3	PP		1,09	5,04		
GA3	NF	- 2	1,00	4,97	$1,18 \pm 0,18$	$5,28 \pm 0,36$
GC1	NF		1,13	5,09		
GD2	NF		1,42	5,78		
GA1	F3M	- 6	0,79	4,15	$0,97 \pm 0,15$	$5,13 \pm 0,74$
GB2	F3M		1,15	5,92		
GC3	F3M		0,96	5,32		

Z výsledných průměrných hodnot v tabulce 11 je vidět, že u materiálu austenitické oceli s jakostí AISI 304 s rostoucím úhlem čela roste hodnota drsnosti R_a a rovněž hodnota R_z . Při pohledu na odchylku měření, ale tyto hodnoty nejsou tak důvěryhodné.

AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel

Tab. 12 Hodnoty parametrů drsnosti R_a a R_z na duplexní oceli

vzorek	utvařeč	úhel čela [°]	R_a [μm]	R_z [μm]	$\langle R_a \rangle \pm \Delta R_a$ [μm]	$\langle R_z \rangle \pm \Delta R_z$ [μm]
DA2	SF	+ 12	1,20	5,09	1,20 ± 0,24	5,28 ± 0,36
DB3	SF		1,49	5,78		
DD1	SF		0,91	4,96		
DB1	PP	+ 7	1,36	5,75	1,30 ± 0,05	5,44 ± 0,21
DC2	PP		1,30	5,28		
DD3	PP		1,24	5,30		
DA3	NF	- 2	1,23	5,11	1,18 ± 0,07	4,91 ± 0,32
DC1	NF		1,08	4,46		
DD2	NF		1,23	5,17		
DA1	F3M	- 6	0,75	4,41	0,92 ± 0,13	4,80 ± 0,36
DB2	F3M		1,07	5,27		
DC3	F3M		0,95	4,73		

Výsledné hodnoty z tabulky 12 poukazují na to, že s rostoucím úhlem čela rostou hodnoty R_a a R_z . Avšak hodnoty naměřené na kroužcích obrobené s utvařečem SF toto tvrzení vyvracejí.

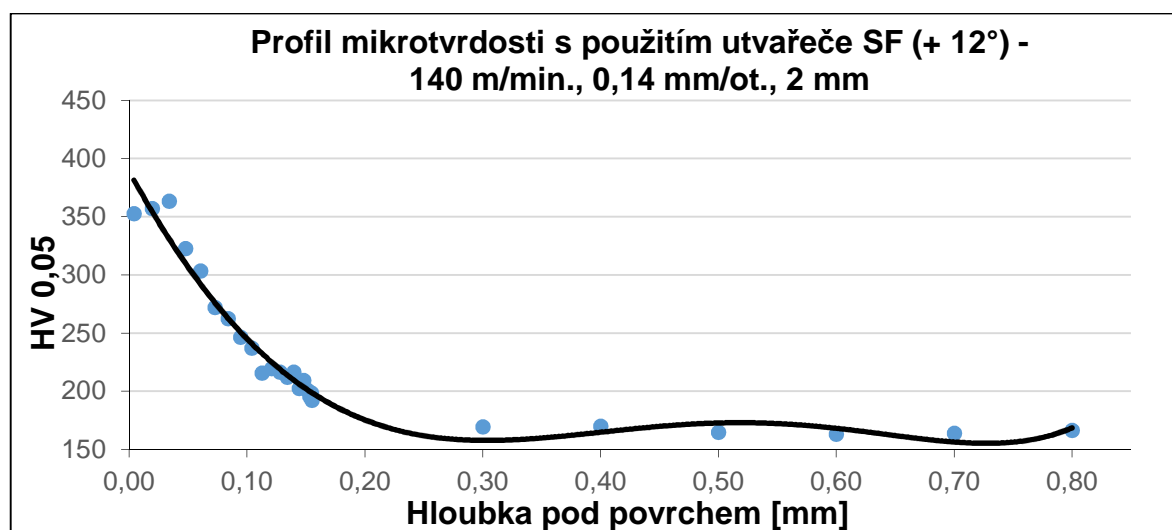
Dílčí závěr

Naměřené hodnoty R_a a R_z u obou materiálů prokazují určitou souvislost s úhlem čela. Rozdíly jsou však velmi malé a spolu s relativně velkou odchylkou měření nelze vyvodit jednoznačný závěr. Spíše to potvrzuje tvrzení, že úhel sklonu čela neovlivňuje hodnoty drsnosti parametrů R_a a R_z [1].

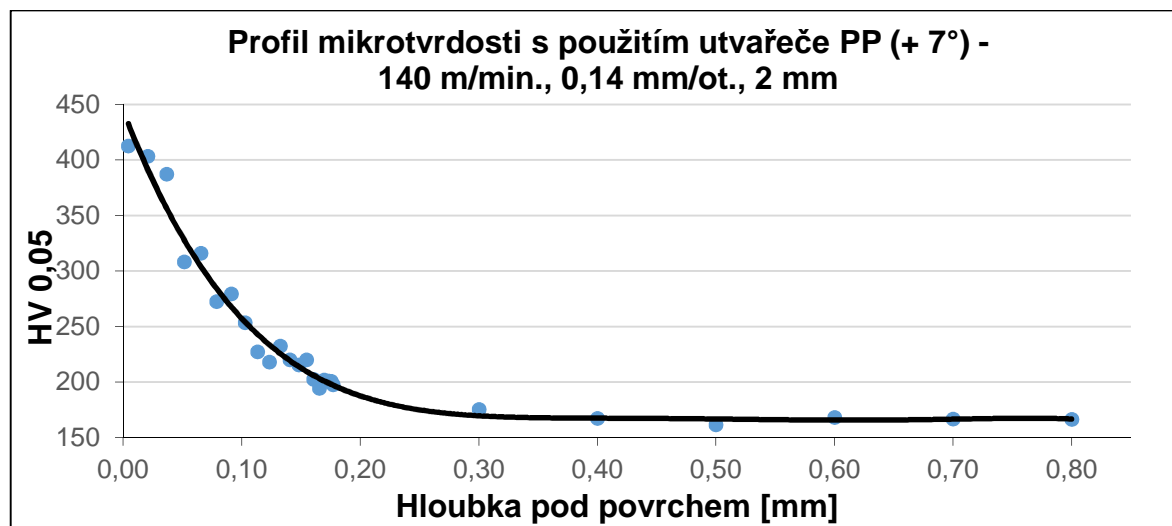
3.6.2 Stupeň a hloubka zpevnění

K vyhodnocení a porovnání stupně a hloubky zpevnění poslouží následující grafy 1 - 8, které jsou řazeny dle druhu obráběného materiálu a dle úhlu čela nástroje od pozitivního po negativní. Všechny grafy jsou fitnuty polynomem 5-tého stupně pro přehledné vyjádření průběhu mikrotvrdosti. Ukázka surových dat včetně chybových úseček je v příloze P1.

AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel

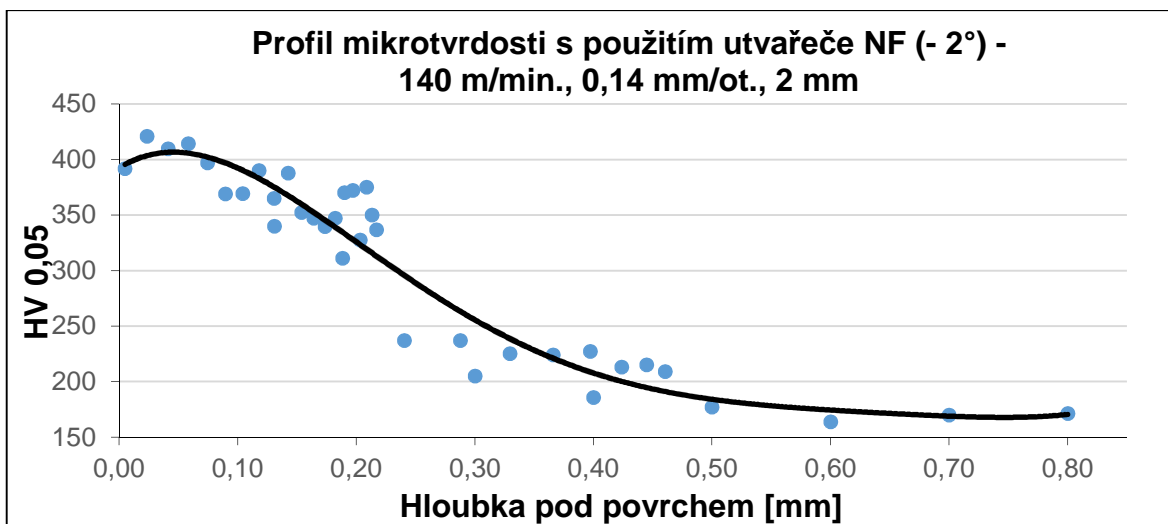


Graf 1 Profil mikrotvrdosti austenitické oceli s použitím utvařeče SF (+ 12°)

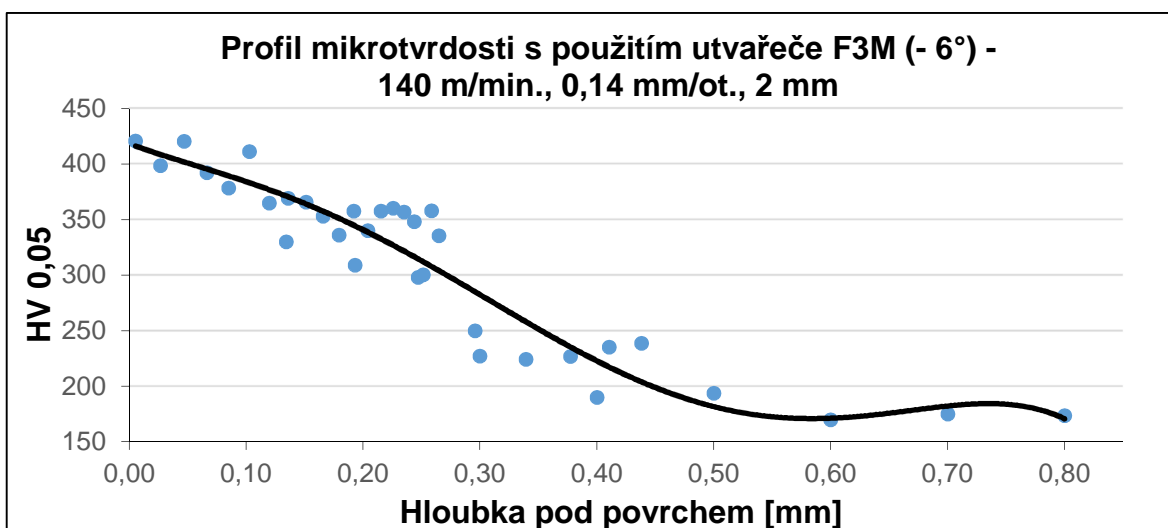


Graf 2 Profil mikrotvrdosti austenitické oceli s použitím utvařeče PP (+ 7°)

U grafů 1 a 2 je vidět, že s pozitivním úhlem čela je hloubka zpevnění přibližně do 0,2 mm pod povrchem. Při obrábění s utvařečem SF je zpevnění těsně pod povrchem rovno 360 HV 0,05 na rozdíl od obrábění s utvařečem PP, kde hodnoty dosahují 420 HV 0,05.



Graf 3 Profil mikrotvrdosti austenitické oceli s použitím utvařeče NF (- 2°)



Graf 4 Profil mikrotvrdosti austenitické oceli s použitím utvařeče F3M (- 6°)

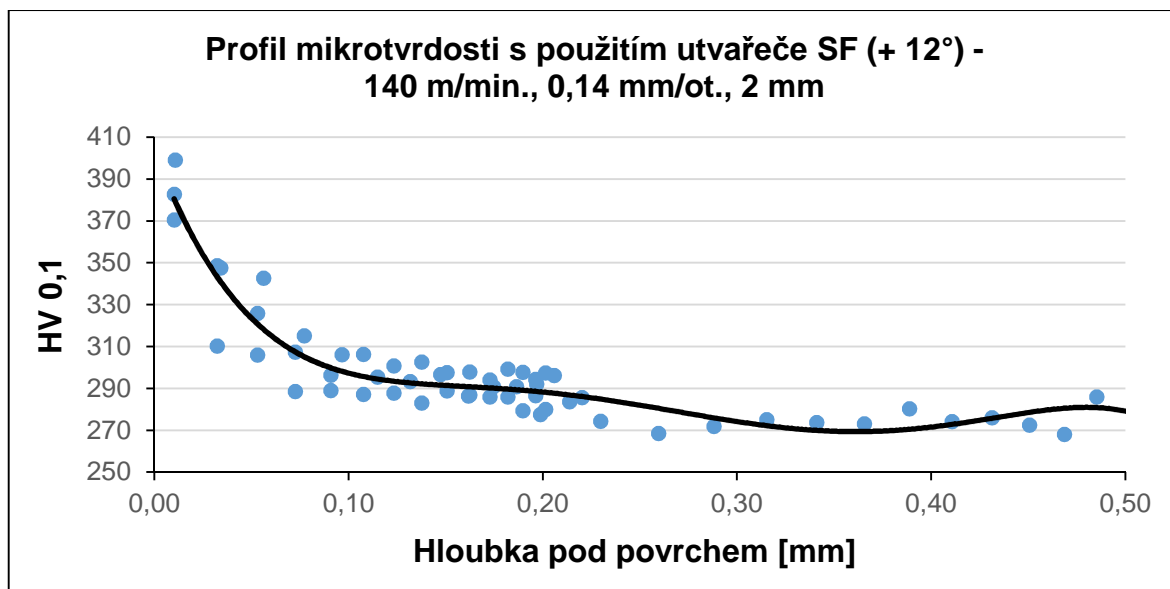
U grafů 3 a 4 je vidět, že s negativním úhlem čela zpevnění dosahuje do 0,5 mm. Velikosti zpevnění těsně pod povrchem se jsou téměř stejné, ale profil zpevnění se mírně liší.

Dílčí závěr

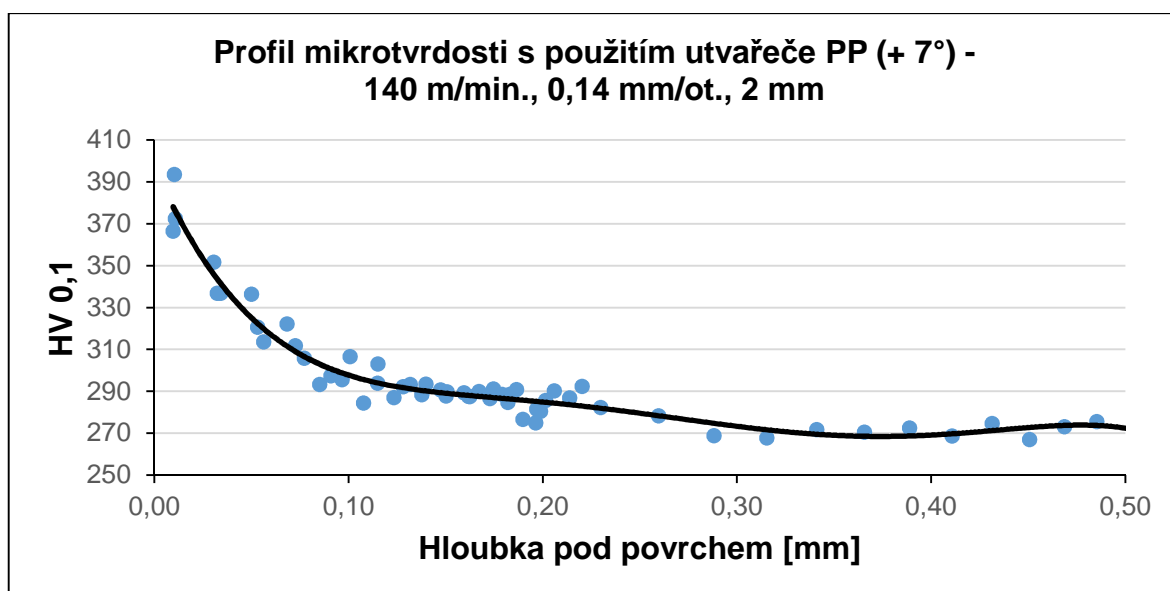
V případě experimentu s destičkami opatřenými různými utvařeči bylo možné opakovaně pozorovat závislost mezi velikostí úhlu čela a hloubkou zpevněné vrstvy. Povrch vytvořený destičkou F3M (- 6°) vykazoval hloubku zpevněné vrstvy až 0,5 mm. Na druhé straně destička SF s pozitivní geometrií čela + 12° dosahovala již v hloubce 0,2 mm tvrdosti základního materiálu.

Hlavním důvodem těchto průběhů mikrotvrdosti je zpevňování austenitické oceli za studena, kde u negativního úhlu čela se materiál značně pěchuje v oblasti nástroje oproti pozitivnímu úhlu čela.

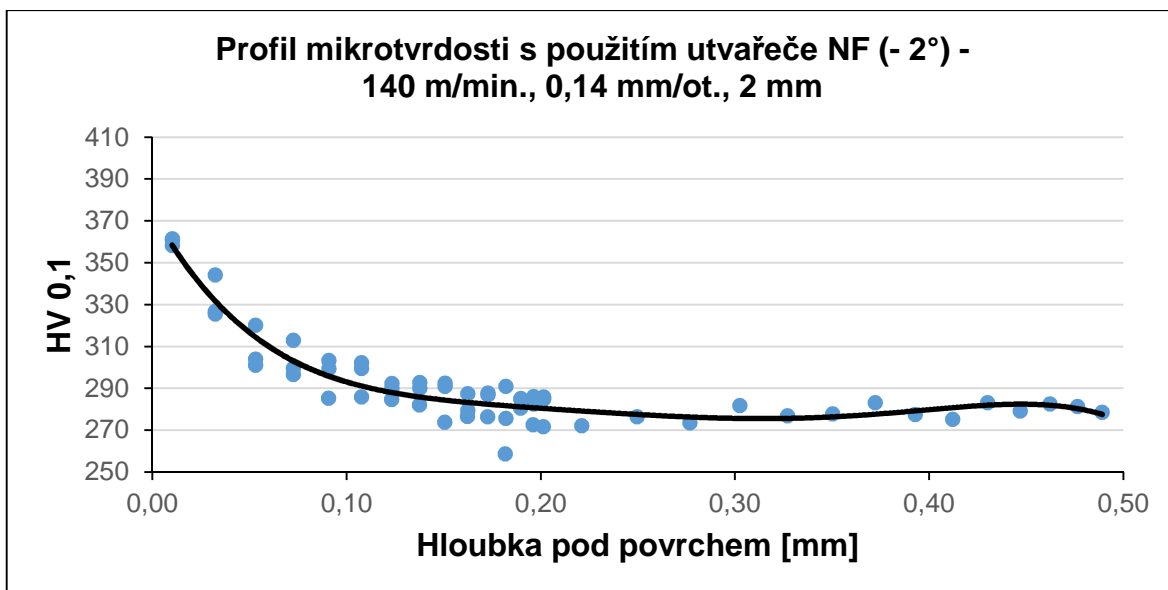
AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel



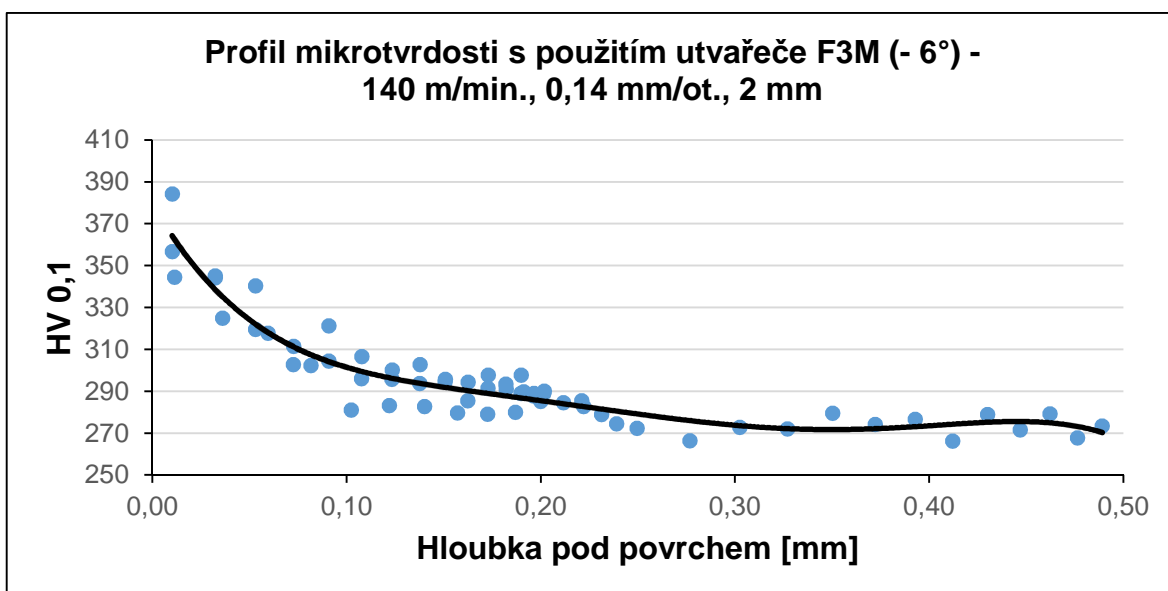
Graf 5 Profil mikrotvrdosti duplexní oceli s použitím utvařeče SF (+ 12°)



Graf 6 Profil mikrotvrdosti duplexní oceli s použitím utvařeče PP (+ 7°)



Graf 7 Profil mikrotvrdosti duplexní oceli s použitím utvařeče NF (- 2°)



Graf 8 Profil mikrotvrdosti duplexní oceli s použitím utvařeče F3M (- 6°)

Dílčí závěr

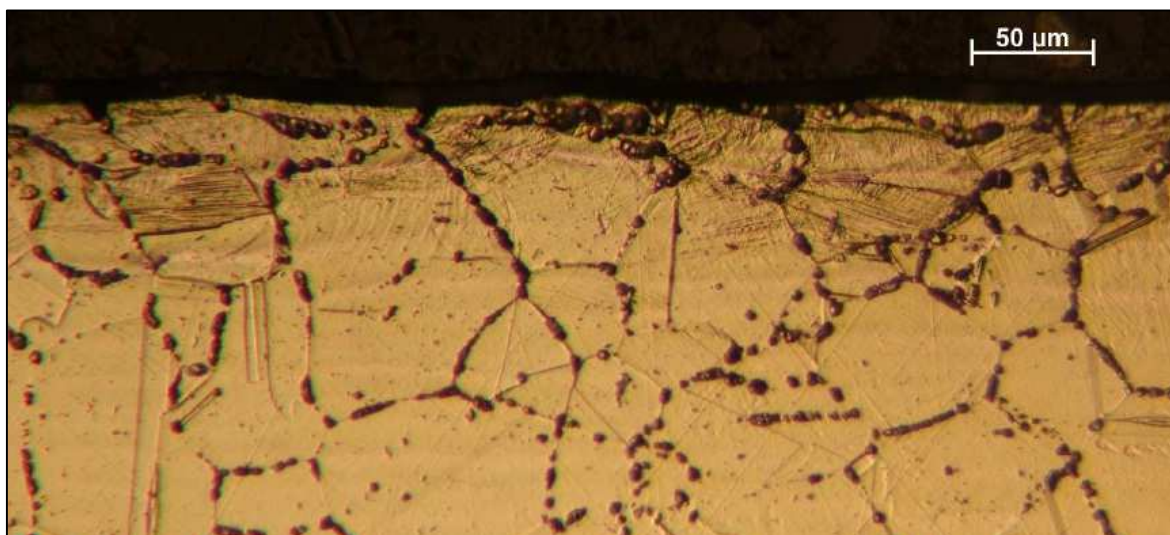
Při porovnání grafů 5,6,7 a 8 nebyla nalezena bližší souvislost mezi úhlem sklonu čela a hloubkou a velikostí zpevnění. Průběhy zpevnění jsou ve všech případech skoro identické. Zpevnění sahá do hloubky přibližně od 0,2 mm do 0,3 mm. Velikost zpevnění při povrchu dosahuje ve všech případech hodnot cca 400 HV 0,1 kromě části po soustružení s destičkou NF, kde se hodnoty pohybují přibližně na 360 HV 0,1.

3.6.3 Struktura povrchu

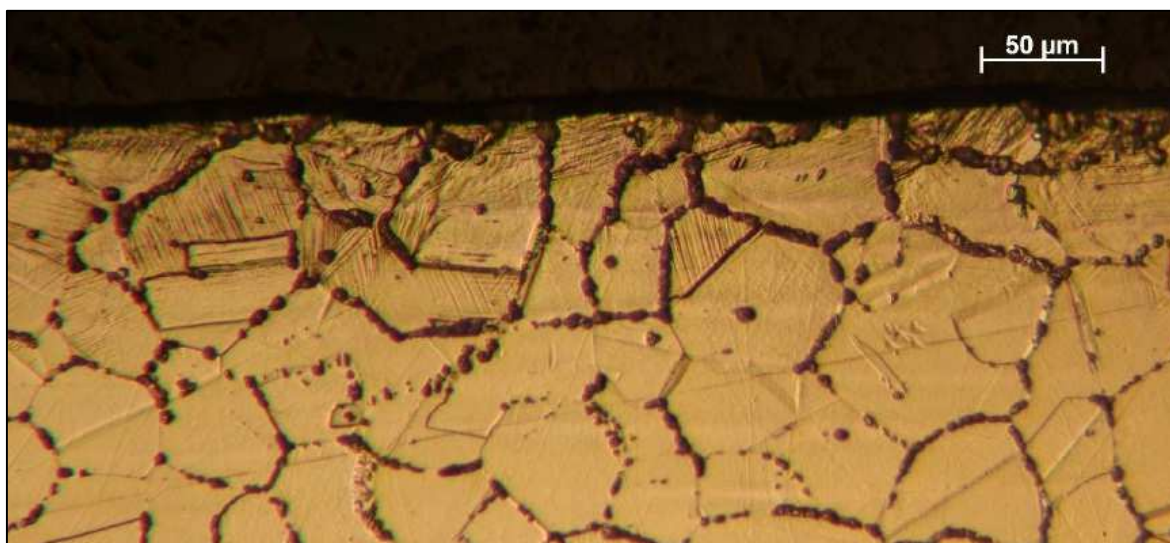
Porovnání struktur v podpovrchové vrstvě po aplikaci soustružení jsou uvedeny na obrázcích 47 - 54, které jsou řazeny dle druhu materiálu vzorku a dle použitého utvařeče. Pro austenitickou ocel byly použity příčné výbrusy (kolmo na řez metalografickou rozbrušovací pilou), pro duplexní ocel podélné výbrusy (použité při měření mikrotvrdosti).

AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel

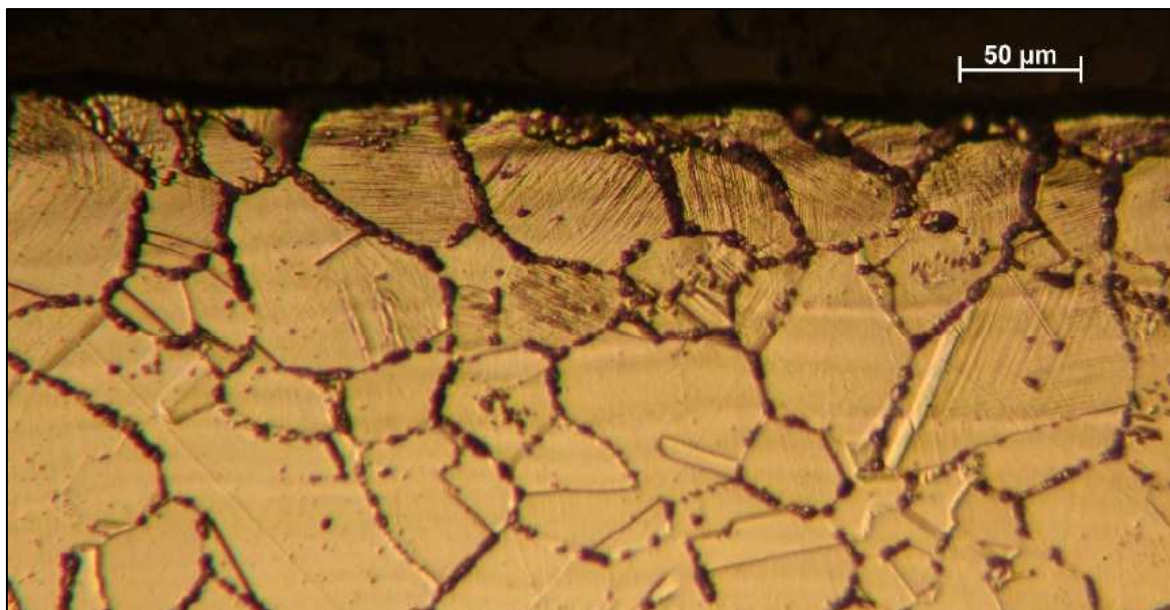
Struktura základního materiálu byla již popsána v podkapitole 3.1.1. U experimentů s různými vyměnitelnými břitovými destičkami a konstantními řeznými podmínkami se ve všech případech vyskytl deformační martenzit v různých tloušťkách pod povrchem.



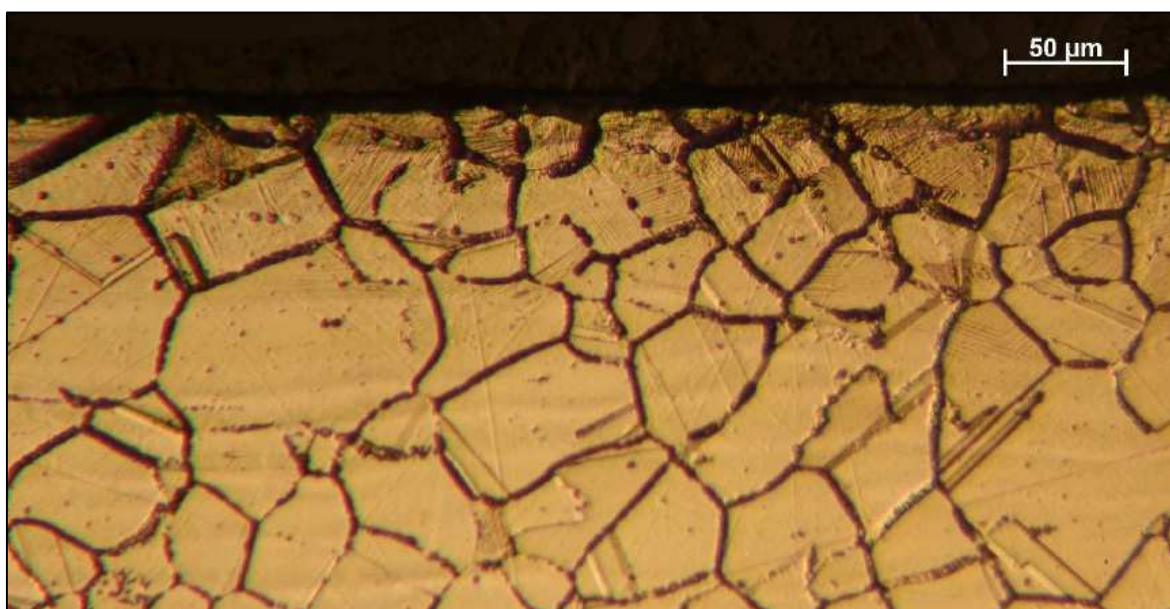
Obr. 47 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče SF (+ 12°)



Obr. 48 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče PP (+ 7°)



Obr. 49 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče NF (- 2°)



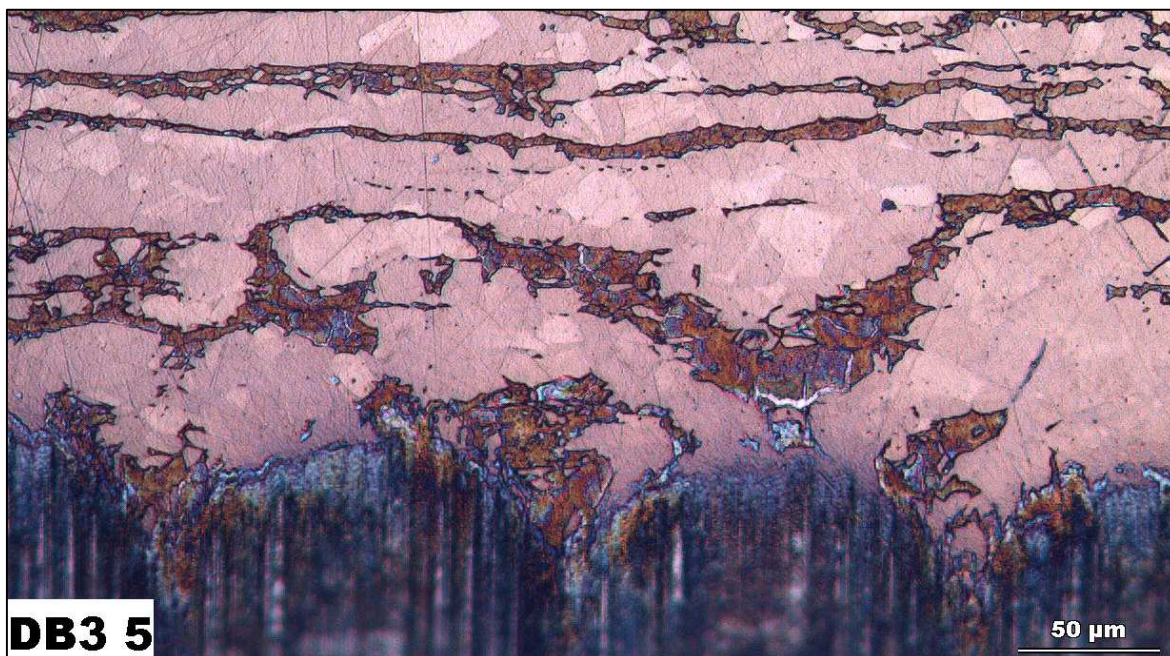
Obr. 50 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče F3M (- 6°)

Dílčí závěr

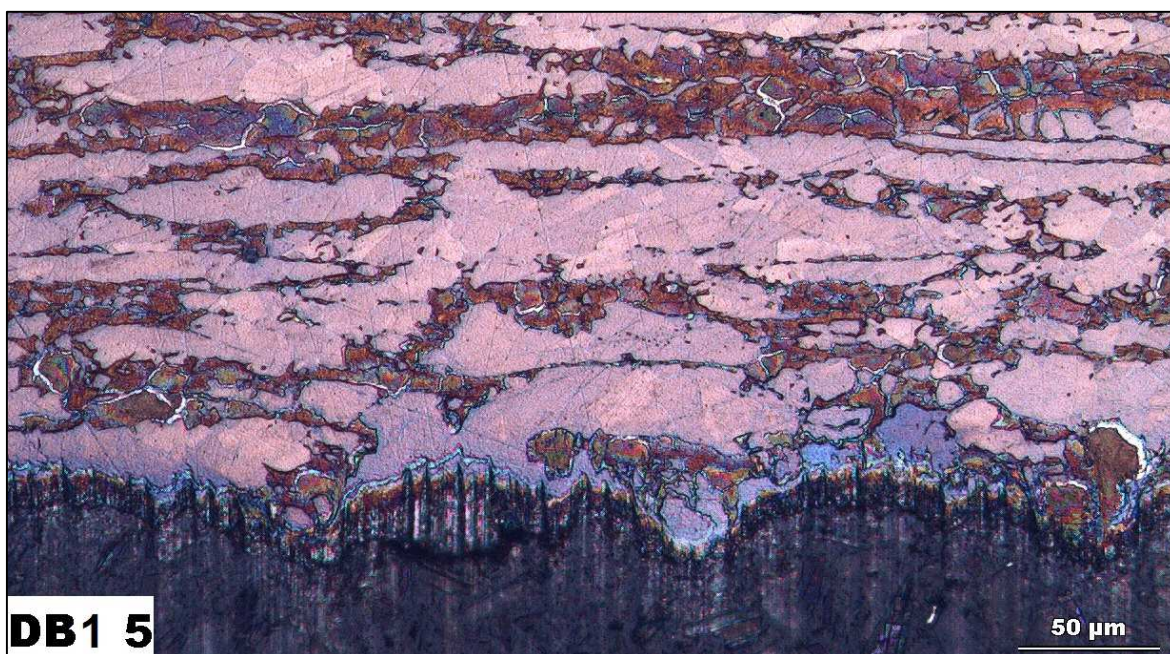
Obrázky 47 až 50 ukazují, že mezi nezasaženou austenitickou strukturou a povrchem s deformačním martenzitem nelze nalézt ostré rozhraní. Pokud je však kritériem maximální hloubka, ve které byl deformační martenzit detekován (byť nesouvisle), lze mezi destičkami nalézt rozdíly. V případě destičky SF s pozitivní geometrií čela (+ 12°) byl zásah deformačního martenzitu pod povrch do hloubky 50 μm. V opačném případě u destičky F3M (- 6°) byl zásah až do hloubky 80 μm.

AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel

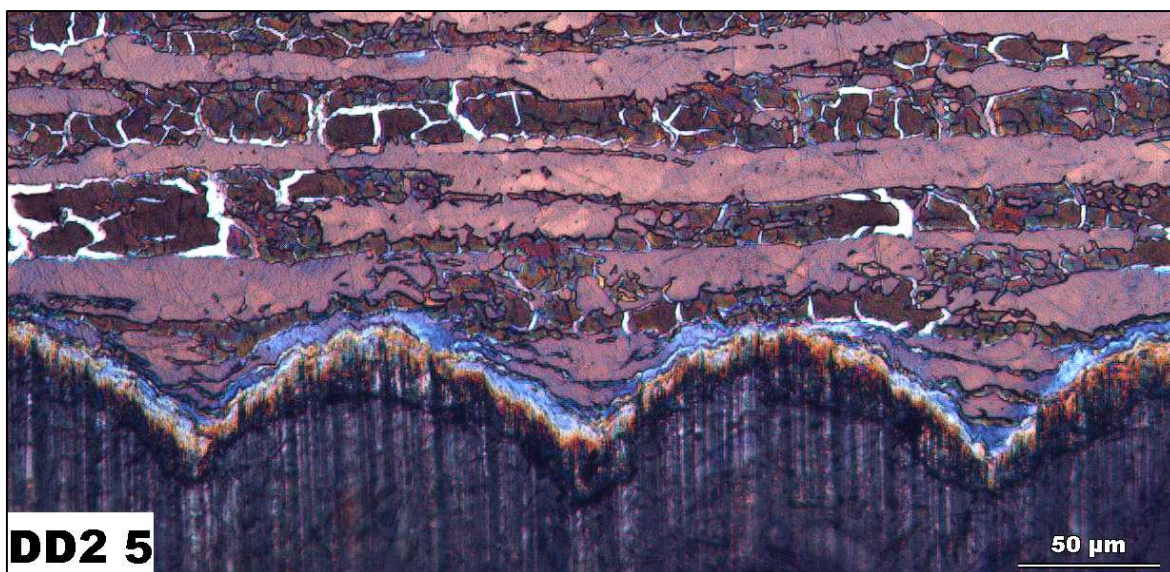
Struktura základního materiálu byla popsána v podkapitole 3.1.2. U experimentů s různými vyměnitelnými břitovými destičkami a konstantními řeznými podmínkami se v duplexní oceli také objevil deformační martenzit.



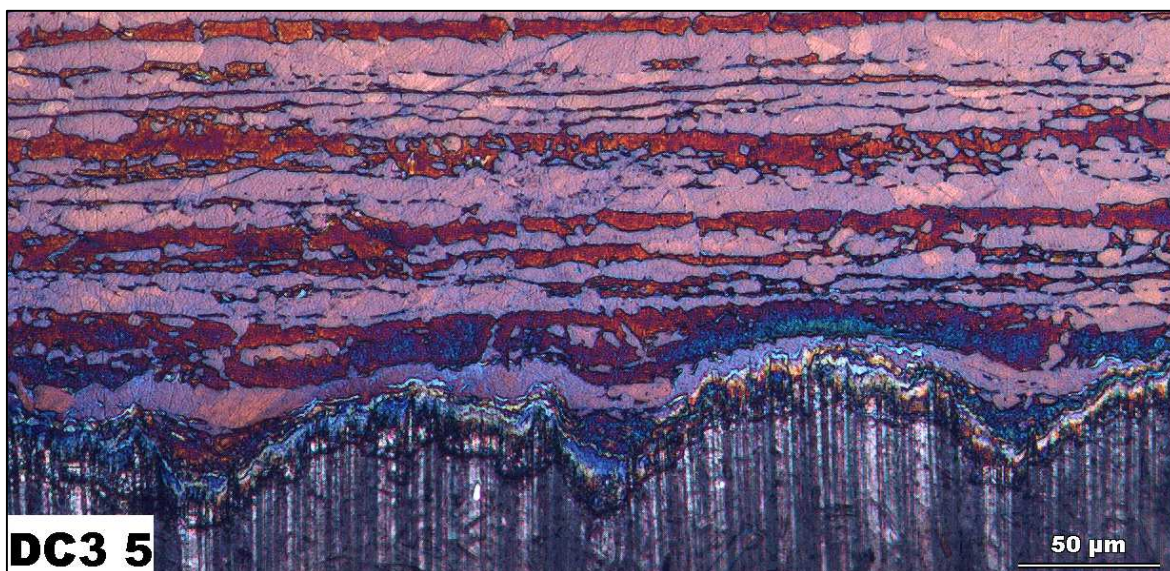
Obr. 51 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče SF (+ 12°)



Obr. 52 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče PP (+ 7°)



Obr. 53 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče NF (- 2°)



Obr. 54 Struktura podpovrchové vrstvy po použití utvařeče F3M (- 6°)

Dílčí závěr

Při pohledu na obrázky 51 - 54 a skutečnosti modrého zbarvení martenzitu [38], lze říci, že s rostoucím úhlem čela klesá objem martenzitu (intenzita modré barvy). Důvodem jsou menší tlaky v oblasti bříty při obrábění.

Ostré rozhraní mezi výskytem deformačního martenzitu a nezasaženou strukturou není průkazné. Pokud se jedná o maximální hloubku, kde se martenzit vyskytuje, pak je ve všech případech přibližně stejná a to cca 30 μm.

3.6.4 Makroskopická zbytková napětí v povrchové vrstvě

K vyhodnocení zbytkových napětí poslouží následující tabulky 13, 14 a 15, které jsou řazeny dle druhu obráběného materiálu, dle zkoumané fáze analyzovaného materiálu a dle úhlu čela nástroje od pozitivního k negativnímu.

AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel

Tab. 13 Zbytková napětí v povrchové vrstvě austenitické oceli - fáze austenit

vzorek	utvařeč	úhel čela [°]	σ_A [MPa]	$\Delta\sigma_A$ [MPa]	σ_T [MPa]	$\Delta\sigma_T$ [MPa]	$\langle\sigma_A\rangle\pm\Delta\sigma_A$ [MPa]	$\langle\sigma_T\rangle\pm\Delta\sigma_T$ [MPa]
GA2	SF	+ 12	- 285	26	396	13	- 300 ± 18	408 ± 9
GD1	SF		- 314	25	420	11		
*GB3	SF		- 97	26	501	19		
GB1	PP	+ 7	- 249	22	422	23	- 249 ± 13	421 ± 10
GC2	PP		- 219	19	441	16		
GD3	PP		- 278	27	401	14		
GA3	NF	- 2	- 224	24	478	14	- 267 ± 13	443 ± 10
GC1	NF		- 307	15	459	20		
GD2	NF		- 271	26	392	19		
GA1	F3M	- 6	- 172	18	526	25	- 232 ± 15	463 ± 12
GB2	F3M		- 290	26	426	23		
GC3	F3M		- 233	34	436	14		

* Kvůli řádově odlišné hodnotě makroskopického zbytkového napětí na povrchu oblasti GB3 v axiálním směru nebyla tato oblast započítána do průměru. Rozdíl mohl být způsoben lokálním zpevněním materiálu, vměstkem nebo nestabilitou řezného procesu.

Dílčí závěr

Z tabulky 13 je patrné, že geometrie řezného nástroje má vliv na makroskopická zbytková napětí. Se snižujícím se úhlem čela tlaková napětí ve směru axiálním klesají a ve směru tangenciálním tahová zbytková napětí rostou. Důvodem tahových napětí ve směru tangenciálním je natahování struktury materiálu při interakci s řezným nástrojem.

AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel
Tab. 14 Zbytková napětí v povrchové vrstvě austenitické oceli - fáze ferit

vzorek	utvařec	úhel čela [°]	σ_A [MPa]	$\Delta\sigma_A$ [MPa]	σ_T [MPa]	$\Delta\sigma_T$ [MPa]	$\langle\sigma_A\rangle\pm\Delta\sigma_A$ [MPa]	$\langle\sigma_T\rangle\pm\Delta\sigma_T$ [MPa]
DA2	SF	+ 12	50	33	352	32	38 ± 14	375 ± 12
DB3	SF		25	51	398	38		
*DD1	SF		- 458	56	- 149	6		
**DB1	PP	+ 7	- 187	12	347	31	23 ± 23	281 ± 10
DC2	PP		23	23	215	28		
*DD3	PP		- 317	30	107	40		
DA3	NF	- 2	32	46	190	40	28 ± 12	248 ± 14
DC1	NF		24	26	305	44		
*DD2	NF		- 365	69	23	21		
DA1	F3M	- 6	45	44	316	35	44 ± 14	347 ± 13
DB2	F3M		42	40	305	45		
**DC3	F3M		220	39	419	35		

*Použitá trubka "D" vykazovala ve všech směrech velmi odlišné hodnoty, proto nebyly započítány do průměrů. Příčinou by mohla být špatná várka z výroby.

**Kvůli řádově odlišné hodnotě makroskopického zbytkového napětí na povrchu oblasti DB1 a DC3 v axiálním směru nebyla tato oblast započítána do průměru. Rozdíl mohl být způsoben lokálním zpevněním materiálu, vměstkem nebo nestabilitou řezného procesu.

Tab. 15 Zbytková napětí v povrchové vrstvě duplexní oceli - fáze austenit

vzorek	utvařec	úhel čela [°]	σ _A [MPa]	Δσ _A [MPa]	σ _T [MPa]	Δσ _T [MPa]	<σ _A >±Δσ _A [MPa]	<σ _T >±Δσ _T [MPa]
DA2	SF	+ 12	245	45	842	76	235 ± 18	776 ± 18
DB3	SF		225	65	710	33		
*DD1	SF		- 375	56	138	88		
DB1	PP	+ 7	186	50	747	30	216 ± 21	769 ± 14
DC2	PP		246	75	790	51		
*DD3	PP		- 190	39	603	71		
DA3	NF	- 2	195	59	561	73	221 ± 18	625 ± 23
DC1	NF		246	46	688	62		
*DD2	NF		- 133	50	372	47		
DA1	F3M	- 6	238	41	693	18	263 ± 14	726 ± 18
DB2	F3M		219	25	771	75		
DC3	F3M		331	61	714	66		
*Použitá trubka "D" vykazovala ve všech směrech velmi odlišné hodnoty, proto nebyly započítány do průměrů. Příčinou by mohla být špatná várka z výroby.								

Dílčí závěr

Z tabulek 14 a 15 vyplývá, že pro obrábění duplexní oceli z pohledu zbytkových napětí v povrchové vrstvě se jeví jako nejvhodnější nástroj s úhlem čela - 2°. V tangenciálním směru nabývá nejmenších tahových hodnot, jak u fáze feritické, tak u fáze austenitické. Vysoké hodnoty zbytkových napětí u austenitické fáze ve směru tangenciálním jsou z pohledu odolnosti povrchu určující.

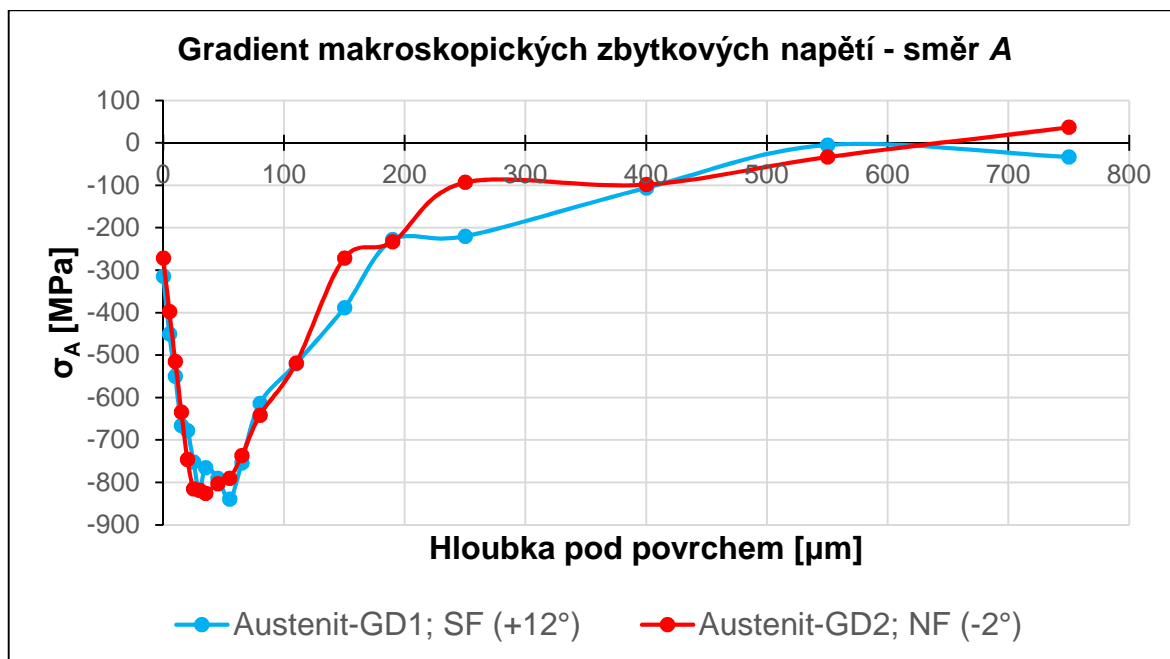
Při porovnání austenitických fází obou materiálů jsou vidět značné rozdíly. Austenitická ocel má zbytkové napětí ve směru *A* tlaková a ve směru *T* tahová. Naopak austenitická fáze u duplexní oceli má ve směru *A* tahová zbytková napětí a ve směru *T* mnohem vyšší hodnoty tahových zbytkových napětí.

3.6.5 Gradient makroskopických zbytkových napětí

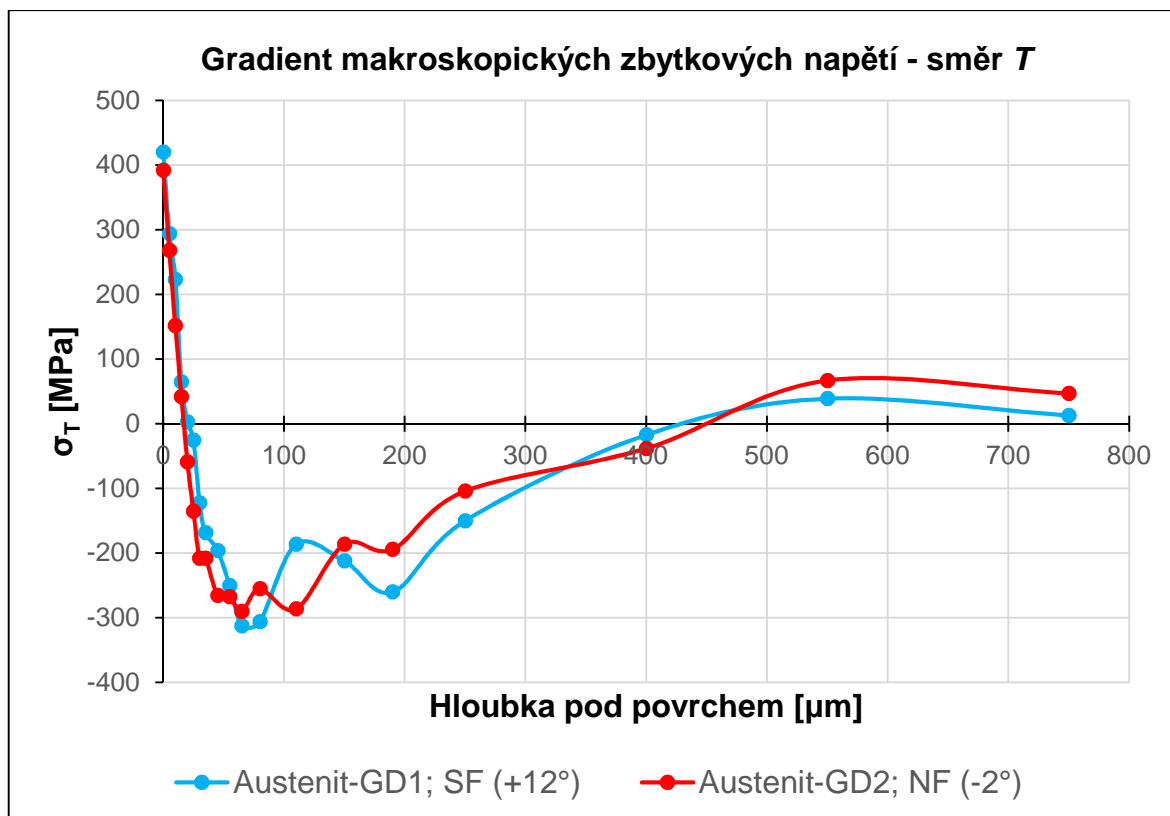
Za účelem ověření vlivu úhlu čela na stav hodnot podpovrchových zbytkových napětí byla provedena analýza gradientu makroskopických zbytkových napětí pro dva vybrané vzorky ve směru axiálním a tangenciálním. Výsledky jsou vyneseny v grafech 9 - 12.

AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel

U austenitické oceli byla pro dva vzorky s odlišným úhlem čela, GD1 (úhel čela + 12°) a GD2 (úhel čela - 2°), provedena rentgenografická tenzometrická analýza gradientu makroskopických zbytkových napětí.



Graf 9 Gradient makroskopických zbytkových napětí austenitické oceli ve směru *A*



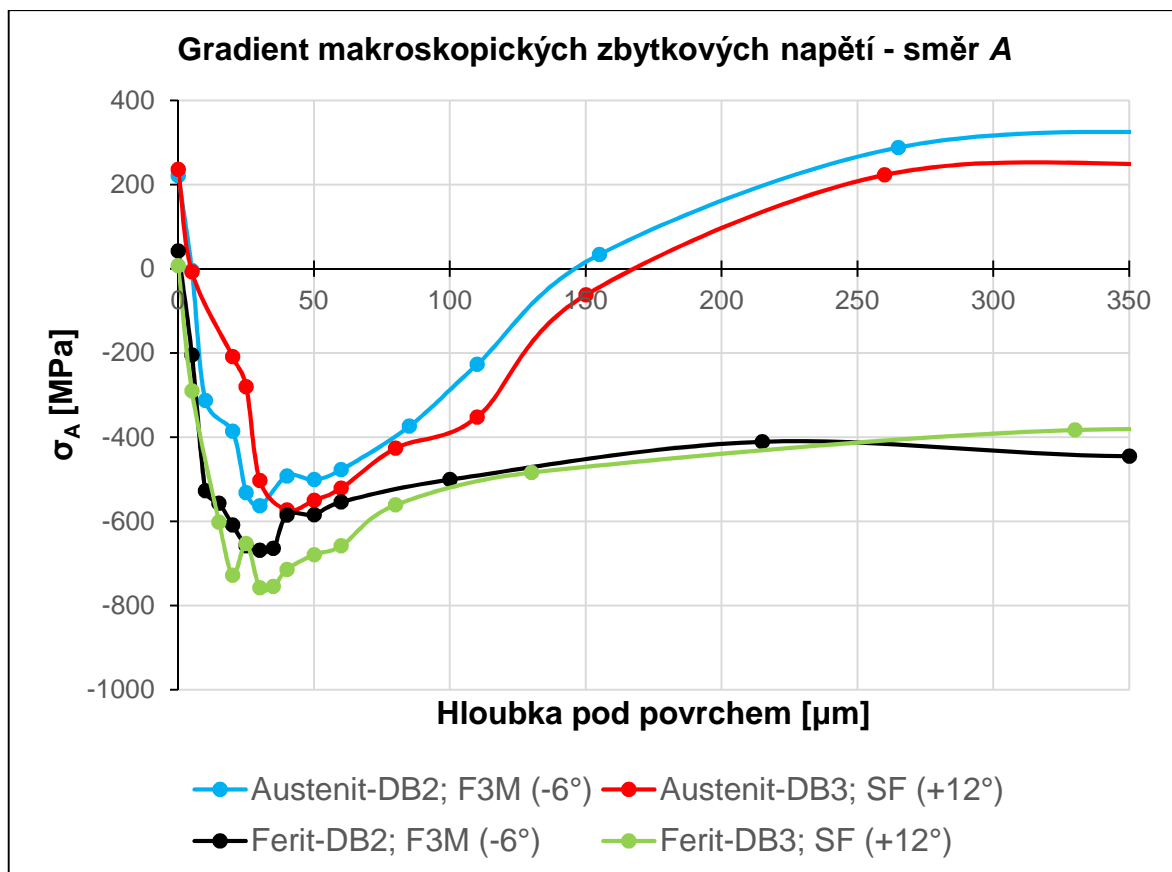
Graf 10 Gradient makroskopických zbytkových napětí austenitické oceli ve směru T

Dílčí závěr

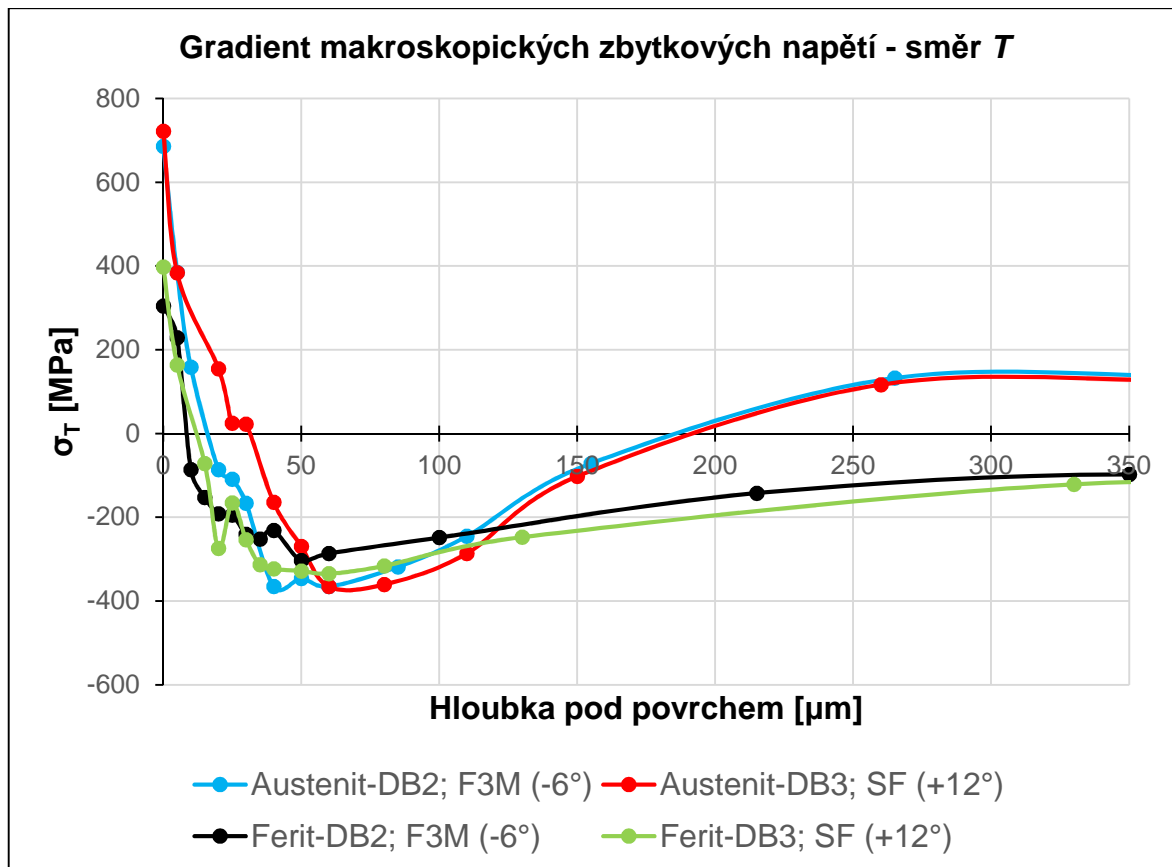
Z grafu 9 a 10 je patrné, že úhel čela nástroje, oproti předpokladům, nemá vliv na hloubkové průběhy gradientů. Důvodem je malý podíl deformačního martenzitu v ozářeném objemu materiálu. Pro hloubkovou změnu mikrotvrdosti je podíl dostatečný, ovšem pro změnu zbytkových napětí nikoli.

AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel

U duplexní oceli byla také pro dva vzorky s odlišným úhlem čela, DB3 (úhel čela + 12°) a DB2 (úhel čela - 6°), provedena rentgenografická tenzometrická analýza gradientu makroskopických zbytkových napětí a to jak na feritické tak na austenitické fázi, které jsou v materiálu přibližně v poměru 50 : 50 hm.%. Tento fakt byl potvrzen rentgenografickou difrakční fázovou analýzou, viz příloha P2.



Graf 11 Gradient makroskopických zbytkových napětí duplexní oceli ve směru A



Graf 12 Gradient makroskopických zbytkových napětí duplexní oceli ve směru T

Dílčí závěr

V grafech 11 a 12 jsou vidět určité rozdíly. Lokální maximum gradientu makroskopických zbytkových napětí austenitické fáze ve směru A u vzorku s použitým utvařečem SF (+ 12°) je posunuto do větší hloubky oproti lokálnímu maximu s utvařečem F3M (- 6°). Ve směru T je pozorován obdobný rozdíl, kde u vzorku s použitým utvařečem SF (+ 12°) je lokální maximum gradientu makroskopických zbytkových napětí posunuto do větší hloubky oproti průběhu s utvařečem F3M (- 6°). U průběhů feritické fáze jsou spatřeny také určité odlišnosti. Největší rozdíl je ve směru A, kde ve stejné hloubce má povrch soustružený s utvařečem SF (+ 12°) o přibližně 100 MPa větší tlakové zbytkové napětí. Ve směru T jsou hodnoty feritické fáze velmi podobné.

Na základě výsledku rentgenografické tenzometrické analýzy lze také konstatovat fakt, že v základním materiálu byla zjištěna u feritické fáze mírná tlaková zbytková napětí cca - 100 MPa a u austenitické fáze naopak tahová makroskopická zbytková napětí cca 150 MPa. Tyto výsledky potvrzují teoretické předpoklady, kdy materiál jako celek má tzv. beznapěťový stav, kdy jsou obě fáze tzv. v rovnováze. Toto bylo potvrzeno pomocí odvrtávací metody (viz příloha P3 a P4), která je založena na měření deformací uvolněných pomocí vrtání malého otvoru do studovaného materiálu jako celku (obě fáze). Tj. $\sigma_{\text{celek}} = \sigma_{\text{austenit}} + \sigma_{\text{ferit}}$.

V technické praxi jsou zbytková napětí obvykle stanovena na základě celkové deformace vzorku. Tento postoj popisuje pevné skupenství jako celek (strojní součást), ale nebere v úvahu, že každá fáze se chová vzhledem k zatížení odlišně. V praxi bývá obvyklé, že zatěžovaná strojní komponenta praskne vždy v tzv. nejslabším místě, tj. ve fázi, která obsahuje méně vhodné zbytkové napětí. Z tohoto důvodu byla zbytková napětí v duplexní oceli stanovena u každé fáze zvlášť.

3.6.6 Měření magnetoelastického parametru

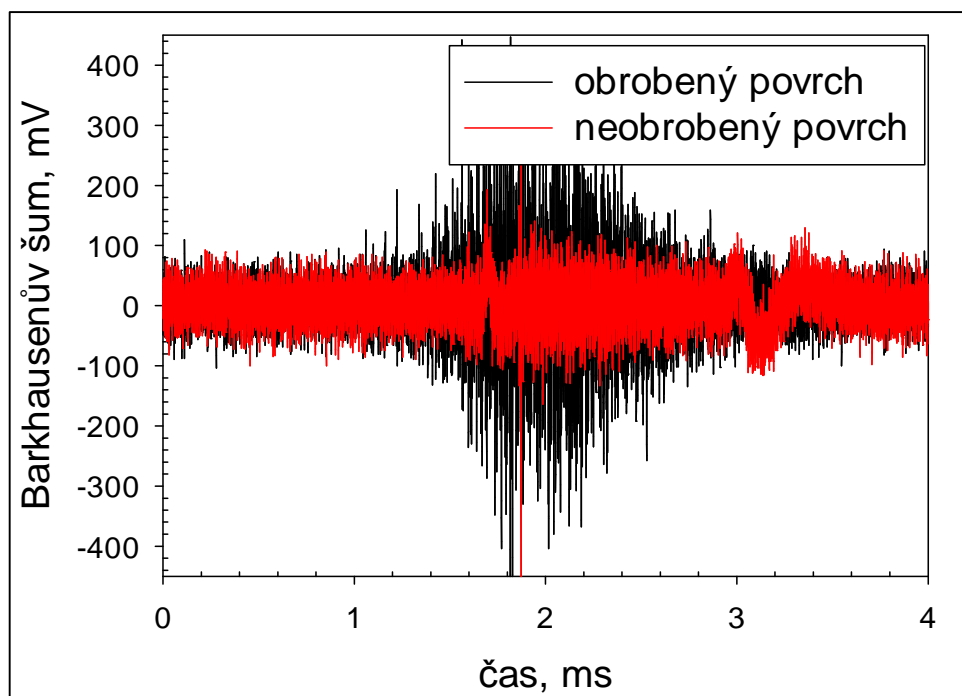
Měření magnetoelastického parametru mp bylo provedeno pouze ve směru tangenciálním z důvodu vyšších hodnot tahových zbytkových napětí a z toho také vyplývající vyšší citlivost měření. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulkách 16 a 17.

AISI 304 (EN 1.4301) - austenitická ocel

Pro potvrzení, či vyvrácení přítomnosti deformačního martenzitu v plasticky deformované povrchové vrstvě bylo provedeno měření tzv. magnetoelastického parametru mp , tj. magnetické odezvy materiálu na vnější magnetický signál. V tabulce 16 jsou hodnoty mp pro jednotlivé vzorky. Signál Barkhausenova šumu pro vybraný obrobený vzorek v porovnání s neobrobeným vzorkem je v obr. 55.

Tab. 16 Magnetická odezva materiálu mp na vnější magnetický signál ve směru T

vzorek	utvařeč	úhel čela [°]	mp [mV]	<mp>±Δmp [mV]
GA2	SF	+ 12	65,4	58 ± 5
GD1	SF		55,4	
GB3	SF		53	
GD3	PP	+ 7	57,3	52 ± 3
GB1	PP		50	
GC2	PP		50	
GD2	NF	- 2	58	55 ± 5
GC1	NF		48	
GA3	NF		59	
GB2	F3M	- 6	53,5	58 ± 3
GC3	F3M		61	
GA1	F3M		60	
pozadí/neobrobený povrch			31	



Obr. 55 Signál Barkhausenova šumu obrobeného (s deformačním martenzitem) a neobrobeného (bez deformačního martenzitu) povrchu vzorku

Dílčí závěr

Z tabulky 16 je patrné, že magnetoelastickou analýzou Barkhausenova šumu byla v paramagnetickém materiálu (austenit) detekována feromagnetická fáze (martenzit). Tento fakt dokládá i obrázek 55, kde je patrný značný rozdíl snímaných signálů z obrobeného a neobrobeného povrchu. Toto tvrzení bylo potvrzeno opět rentgenografickou difrakční fázovou analýzou viz příloha P2.

Dále bylo touto metodou prokázáno, že změna geometrie nemá vliv na množství deformačního martenzitu v povrchových vrstvách, což dokazuje tabulka 16, kde nejsou vidět značné rozdíly v hodnotách.

AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel

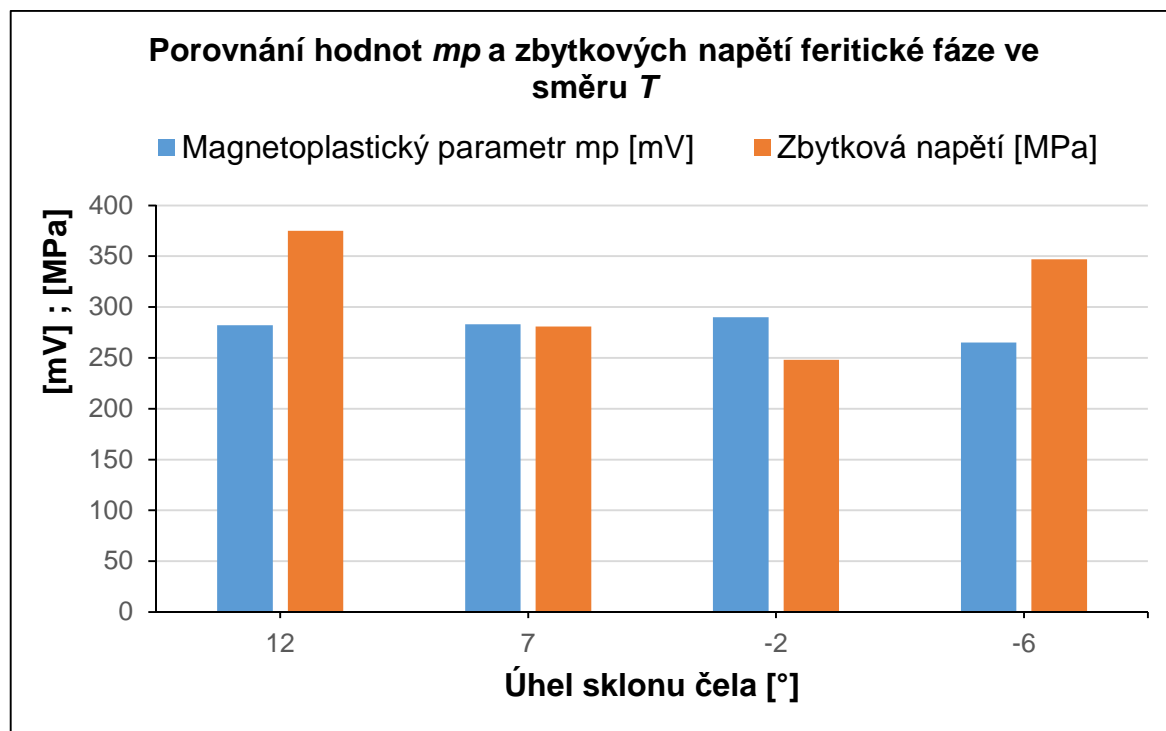
Magnetoelastickou analýzou Barkhausenova šumu u duplexní oceli nebylo možné prokázat výskyt deformačního martenzitu. Důvodem byla feromagnetická fáze ferit obsahovaná z 50% v základní struktuře. Proto možný martenzit o obsahu několika procent nemohl signál Barkhausenova šumu významně ovlivnit. Z tohoto důvodu byla analýza využita pro porovnání magnetoelastického parametru mp (tab. 17) se zbytkovými napětími (tab. 14), které mp značně ovlivňují, viz podkapitola 2.4.4.2.

Tab. 17 Magnetická odezva materiálu mp na vnější magnetický signál ve směru T

vzorek	utvařeč	úhel čela [°]	mp [mV]	<mp>±Δmp [mV]
DB1	SF	+ 12	318,73	282 ± 36
DC2	SF		245,32	
*DD3	SF		267,42	
DA3	PP	+ 7	258,35	283 ± 24
DC1	PP		306,85	
*DD2	PP		206,54	
DA2	NF	- 2	289,62	290 ± 1
DB3	NF		290,15	
*DD1	NF		231,21	
DA1	F3M	- 6	289,2	265 ± 18
DB2	F3M		257,69	
DC3	F3M		247,15	
*Použitá trubka "D" vykazovala u měření zbytkových napětí velmi odlišné hodnoty. Z důvodu souvislosti s parametrem <i>mp</i> byly tyto hodnoty také vyřazeny z počítaných průměrů. Příčinou by mohla být, již zmíněná, špatná várka z výroby.				

Dílčí závěr

Při porovnání hodnot mp v tabulce 17 a hodnot zbytkových napětí feritické fáze duplexní oceli ve stejném směru T v tabulce 14, viz podkapitola 3.6.4, je vidět, že výsledné hodnoty mezi sebou nekorelují. Přehledné porovnání je v grafu 13.



Graf 13 Porovnání hodnot mp a zbytkových napětí feritické fáze ve směru T

4. Diskuze výsledků

Hlavním cílem diplomové práce bylo posoudit vliv úhlu skonu čela na soustružený povrch austenitické a duplexní oceli.

K dosažení cíle byly zvoleny jednotné řezné podmínky pro oba materiály (podkapitola 3.3), tak aby se posoudil pouze vliv úhlu čela na soustružený povrch. Na obrobeném povrchu byla provedena měření následujících parametrů integrity povrchu:

- drsnosti povrchu R_a , R_z ,
- hloubky a velikosti zpevnění,
- struktury povrchu,
- makroskopického zbytkového napětí v povrchu,
- gradientu makroskopických zbytkových napětí,
- magnetoelastického parametru Barkhausenova šumu.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky, vztahy a definice jsou uvedeny v teoretické části kapitole 2. Ta se opírá o odbornou literaturu, obsahuje poznatky o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu (podkapitola 2.1), shrnutí poznatků o nerezových ocelích (podkapitola 2.2), základní informace o integritě povrchu (podkapitola 2.3) a teoretické základy použitých metod (podkapitola 2.4).

Kapitola 3 se věnuje samotným experimentům a následně měření parametrů integrity povrchu. Kapitola obsahuje použité materiály (podkapitola 3.1), stroje, nástroje, měřicí zařízení a pomůcky (podkapitola 3.2), dále řezné podmínky (podkapitola 3.3), metodiku experimentů a měření (podkapitola 3.4 - 3.5).

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků uvedených v podkapitole 3.6 je možno poukázat na následující:

1. Drsnost povrchu (podkapitola 3.6.1).

Úhel sklonu čela nástroje nemá vliv na parametry drsnosti povrchu ani u jednoho ze zkoumaných materiálů. Publikace [39] toto tvrzení potvrzuje a doplňuje, že parametry drsnosti ovlivňuje hlavně rychlost posuvu a poloměr zaoblení špičky nástroje.

2. Hloubka a velikost zpevnění (podkapitola 3.6.2).

Publikace [40] uvádí, že s vyšší houževnatostí materiálu roste velikost a hloubka zpevnění povrchové vrstvy obráběného materiálu. Dále uvádí závislost úhlu sklonu čela nástroje na velikosti zpevnění. Ta udává, že s klesajícím úhlem čela, velikost zpevnění roste.

U austenitické oceli tyto uvedené údaje potvrzují výsledky měření. Tj. úhel sklonu čela nástroje má vliv na velikost a hloubku zpevnění povrchové vrstvy. Konkrétně s klesajícím úhlem čela nástroje stoupá velikost a hloubka zpevnění povrchové vrstvy.

U duplexní oceli se neprokázal vliv úhlu čela na velikost a hloubku zpevnění povrchové vrstvy. To je dáno odlišnými mechanickými vlastnostmi materiálu. Především nižší houževnatostí, jak udává publikace [40].

3. Struktura povrchové vrstvy (podkapitola 3.6.3).

Měření ukázala v podpovrchové vrstvě obou materiálů martenzit. Ten vznikl zásluhou vysokých tlaků a teplot v místě řezu dle publikace [41].

U austenitické oceli byl prokázán vliv úhlu čela na maximální hloubku výskytu martenzitu. S klesajícím úhlem čela max. hloubka výskytu martenzitu rostla.

U duplexní oceli byl prokázán vliv úhlu čela na objem vzniklého martenzitu. S klesajícím úhlem čela nástroje objem vzniklého martenzitu rostl.

4. Makroskopická zbytková napětí v povrchové vrstvě

(podkapitola 3.6.4).

Výsledky měření ukázaly, že po soustružení má austenitická ocel ve směru axiálním povrchová zbytková napětí tlaková, ve směru tangenciálním tahová. To zapříčiňuje natahování struktury ve směru axiálním vlivem interakce nástroje s obráběným materiálem. Duplexní ocel má v obou směrech napětí tahová.

U austenitické oceli při vyšším úhlu čela tahová napětí ve směru tangenciálním klesají a tlaková napětí ve směru axiálním rostou.

Pro soustružení duplexní oceli je z pohledu zbytkových napětí nejvhodnější nástroj s úhlem čela - 2° . V tangenciálním směru nabývá nejmenších tahových hodnot, jak u fáze feritické, tak u fáze austenitické.

U duplexní oceli byly prokázány různé hodnoty zbytkových napětí u fáze α a fáze γ . To zapříčiňují různé skluzové systémy jednotlivých fází. Toto tvrzení potvrzuje článek o zbytkových napětích v duplexních ocelích [42].

5. Gradient makroskopických zbytkových napětí

(podkapitola 3.6.5).

Úhel čela nemá výrazný vliv u austenitické oceli na gradient makroskopických zbytkových napětí jak ve směru tangenciálním, tak i axiálním.

U duplexní oceli jsou vidět malé rozdíly v gradientu makroskopických zbytkových napětí jak ve směru tangenciálním, tak ve směru axiálním.

V axiálním směru u austenitické fáze s rostoucím úhlem čela se lokální maximum v průběhu gradientu makroskopických zbytkových napětí posouvá do větší hloubky. U feritické fáze s rostoucím úhlem čela dosahuje lokální maximum gradientu makroskopických zbytkových napětí vyšších maximálních hodnot tlakového napětí v určité hloubce, která se s úhlem čela nemění.

Ve směru tangenciálním se u austenitické fáze s rostoucím úhlem čela lokální maximum gradientu makroskopických zbytkových napětí posouvá do větší hloubky. U feritické fáze vliv úhlu čela na gradient makroskopických zbytkových napětí není.

6. Magnetoelastický parametr (podkapitola 3.6.6).

Měření magnetoelastického parametru mp u austenitické oceli, dokázalo vznik transformačního martenzitu, tento fakt byl potvrzen rentgenografickou difrakční fázovou analýzou, viz příloha P2.

U duplexní oceli parametr mp nejevil žádnou souvislost s hodnoty zbytkového napětí. To i přes to, že další hlavní proměnnou veličinu ovlivňující parametr mp - tvrdost, vyloučilo měření mikrotvrdosti (podkapitola 3.6.2), kde průběhy velikosti a hloubky zpevnění jsou téměř identické.

5. Závěr

Předložená diplomová práce zpracována na téma „Integrita povrchu po soustružení austenitických a duplexních ocelí“ přispívá k rozšíření poznatků o soustružení zmíněných nerezových ocelích.

Práce je členěna do dvou hlavních částí.

V teoretické části byl proveden rozbor dané problematiky. Hlavní pozornost byla věnována poznatkům o vlivu pracovních podmínek soustružení na integritu povrchu, shrnutí poznatků o nerezových ocelích, základním informacím o integritě povrchu a teoretickým základům použitých metod.

Experimentální část v úvodu popisuje použité materiály, stroje, nástroje, měřicí zařízení a pomůcky, dále řezné podmínky, metodiku experimentů a měření a končí vyhodnocením výsledků.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze formulovat následující:

- a)** Vliv úhlu čela nemá zásadní vliv ani u jednoho ze zkoumaných materiálů na parametry drsnosti R_a a R_z .
- b)** Byl prokázán vliv úhlu čela na velikost a hloubku zpevnění u austenitické oceli. U duplexní oceli tento vliv nebyl.
- c)** Ze zkoumání metalografické struktury byl prokázán vznik transformačního martenzitu u obou zkoumaných ocelí. U austenitické oceli byl tento fakt potvrzen výsledky měření magnetoelastického parametru Barkhausenova šumu a rentgenografickou difrakční fázovou analýzou, viz příloha P2.
- d)** Po soustružení má austenitická ocel ve směru axiálním povrchová zbytková napětí tlaková, ve směru tangenciálním tahová. Duplexní ocel má v obou směrech na fázích α a γ napětí tahová.
- e)** U duplexní oceli byl prokázán vliv úhlu čela na gradient makroskopických zbytkových napětí. U austenitické oceli tento vliv nebyl.
- f)** U duplexní oceli byly zjištěny různé hodnoty zbytkových napětí u fáze α a fáze γ , jenž odpovídají teoretickým předpokladům různých skluzových rovin. Rovnováha obou fází byla prokázána tím, že v základním materiálu (neovlivněném soustružením) jejich průměrná hodnota byla rovnocenná hodnotám zjištěných odvrtávací metodou, viz příloha P1.

Použitá literatura

- [1] KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001, 274 s. ISBN 80-214-196-2.
- [2] ŘEHOŘ, J. *Teoretické a experimentální studium problematiky HSC obrábění ocelí vysoké pevnosti a tvrdosti*. [Disertační práce]. Plzeň: ZČU Fakulta strojní, 2004. 109 s.
- [3] HOUDEK, J. Výhody a limity rychlostního obrábění. *MM průmyslové spektrum*, 2000, roč. 4, č. 3 a 4. ISSN 1212-2572.
- [4] Moderní obrábění nerezových ocelí. *MM průmyslové spektrum*, duben 2003. [online]. [cit. 15. února 2016]. Dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-obrabeni-nerezovych-oceli.html>
- [5] Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svažování a možní korozi. [online]. Italinox. [cit. 15. února 2016]. Dostupné na: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p1>
- [6] Hlavní skupiny nerezových ocelí. [online]. Terapol spol. s r.o. [cit. 15. února 2016]. Dostupné na: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>
- [7] PREISLER, M. Specifikace nerezových materiálů. [online]. ARMAT spol. s.r.o. Listopad 2009. [cit. 20. února 2016]. Dostupné na: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [8] Příručka pro technology: Proces obrábění v nerezových ocelích - závěrečné typy. *MM průmyslové spektrum*, říjen 2012. [online]. [cit. 20. února 2016]. Dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-v-nerezovych-ocelich-zaverecne-tipy.html>
- [9] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci, frézování III*. Brno: VUT FSI v Brně, 2003. ISBN 80-214-2436-2.
- [10] BRYCHTA, J. *Integrita obrobeného povrchu a její charakteristické veličiny při třískovém řezání kovů a jejich slitin*. [online]. Listopad 2012. [cit. 23. února 2016]. Dostupné na: http://integrita.zcu.cz/download/skola1/ostrava_prez2.pdf
- [11] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.

- [12] SLANEC, K. *Konstruování: geometrická přesnost výrobků 1. a 2. díl.* 1 vyd., Praha: ČVUT, 2006. 160 s. ISBN 80-01-02864-X.
- [13] ČSN EN ISO 6507 - 1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. 1999.
- [14] FIALA, J., MENTL, V., ŠUTTA, P. *Struktura a vlastnosti materiálů.* 1 vyd., Praha: Academia, 2003. 572 s. ISBN 80-200-1223-0.
- [15] *Binární diagram železo - uhlík.* [online]. Únor 2016. [cit. 6. března 2016]. Dostupné na: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD_diagram_%C5%BElezo-uhl%C3%ADk#StrojTech
- [16] PŘIKRYL, Z. aj. *Výzkum vlivu technologických podmínek broušení do kulata na kvalitu povrchové vrstvy.* [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT Fakulta Strojní, 1970. 130 s.
- [17] KRAUS, I., GANEV, N. *Difrakční analýza mechanických napětí.* 1 vyd., Praha: ČVUT, 1995. 274 s. ISBN 80-01-01366-9.
- [18] *Co jsou zbytková napětí.* [online]. [cit. 15. března 2016]. Dostupné na: <http://msvantne.webnode.cz/news/co-jsou-zbytkova-napeti/>
- [19] MÁDL, J., HOLEŠOVSKÝ, F., aj. *Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností.* 1. vyd. Ústí nad Labem: Universita J.E. Turkyň, 2008. 230 s. ISBN 978-80-7414-095-2
- [20] NĚMEČEK. *Zkoušky tvrdosti.* [online]. Říjen 2006 [cit. 15. března 2016]. Dostupné na: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [21] MACHÁČ, M. *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot.* [Bakalářská práce]. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s.
- [22] ŠEBESTOVÁ, H. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii.* [online]. Leden 2012. [cit. 23. března 2016]. Dostupné na: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [23] VÁCLAVÍK, J., BUNDA, Z., BOHDAN, P. *Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí.* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, říjen 2012. [cit. 23. března 2016]. Dostupné na: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271_p.pdf
- [24] GANEV, N., KRAUS, I. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí.* [online]. 2002. [cit. 23. března 2016]. Dostupné na: <http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>

- [25] TROJAN, K. *Difrakční studium vlivu laserového svařování na stav reálné struktury polykrystalických látek*. [Bakalářská práce]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2013. str. 65.
- [26] KRAUS, I. a GANEV, N. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. str. 171. ISBN 80-01-03099-7.
- [27] Kolařík, K. *Difrakční studium fyzikálních technologií obrábění ocelí*. [Disertační práce]. Praha: ČVUT v Praze. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra inženýrství pevných látek, 2010.
- [28] Lachmann, C., Nitschke-Pagel, T. a Wohlfahrt, H. Characterisation of residual stress relaxation in fatigue loaded welded joints by X-ray diffraction and Barkhausen noise method. *Materials science forum*. 2000, str. 374-381.
- [29] *Nerezová ocel 1.4301*. [online]. Inox. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [30] *Materiálové listy korozivzdorných ocelí*. [online]. Bohdan Bolsano. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
- [31] *Stainless Steel - Austenitic - 1.4301 Bar and Section*. [online]. Aalco. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: <http://www.aalco.co.uk/datasheets/>
- [32] *Okuma Genos L200E – M*. [online]. Misan. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: <http://www.misan.cz/katalog-detail/genos-l200e-m-okuma-genos-l200e-m/?viewpart=2>
- [33] *Iscars elektronick catalog*. [online]. Iscar. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: <https://www.iscar.com/eCatalog/>
- [34] *Lobotom – 3 brochure English*. [online]. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/Labotom-3_brochure_English.pdf
- [35] *CitoPress -10/-20 - English*. [online]. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: <http://aiim.uow.edu.au/content/groups/public/@web/@aiim/documents/doc/uow155162.pdf>
- [36] *Tegamin 25 - English*. [online]. [cit. 5. dubna 2016]. Dostupné na: <http://ipaper.ipapercms.dk/struersas/tegaminenglish/>
- [37] TIITTO, S., SÄYNÄJÄKANGAS, S. (1975). Spectral damping in Barkhausen noise. In: *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 11, No. 6, pp. 1666-1672.

- [38] KOBR, J. *Barevná metalografie železných kovů*. [Bakalářská práce]. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, 2012. 51 s.
- [39] JANÁČ, A., LIPA, Z., PETERKA, J. *Teorie obrábění*. Bratislava: STU, 2006, 199 s.
- [40] BILÍK, O. *Obrábění II – 1. díl Fyzikálně mechanické zákonitosti procesu obrábění*. Ostrava: VŠ Báňská - TU Ostrava, 1999, 2. vydání, 138 s. ISBN 80-7078-962-X.
- [41] NESLUŠAN, M. *Sústruženie kalených ocelí*. Žilina: Žilinská univerzita 2009. ISBN 978-80-554-104-1.
- [42] ČAPEK, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L. aj. *Residual Stress Determination of Duplex Steel Phases for the Purpose of Increasing Service Life of Rotary and Dynamically Loaded Components*. Praha: ČVUT.

Seznam příloh

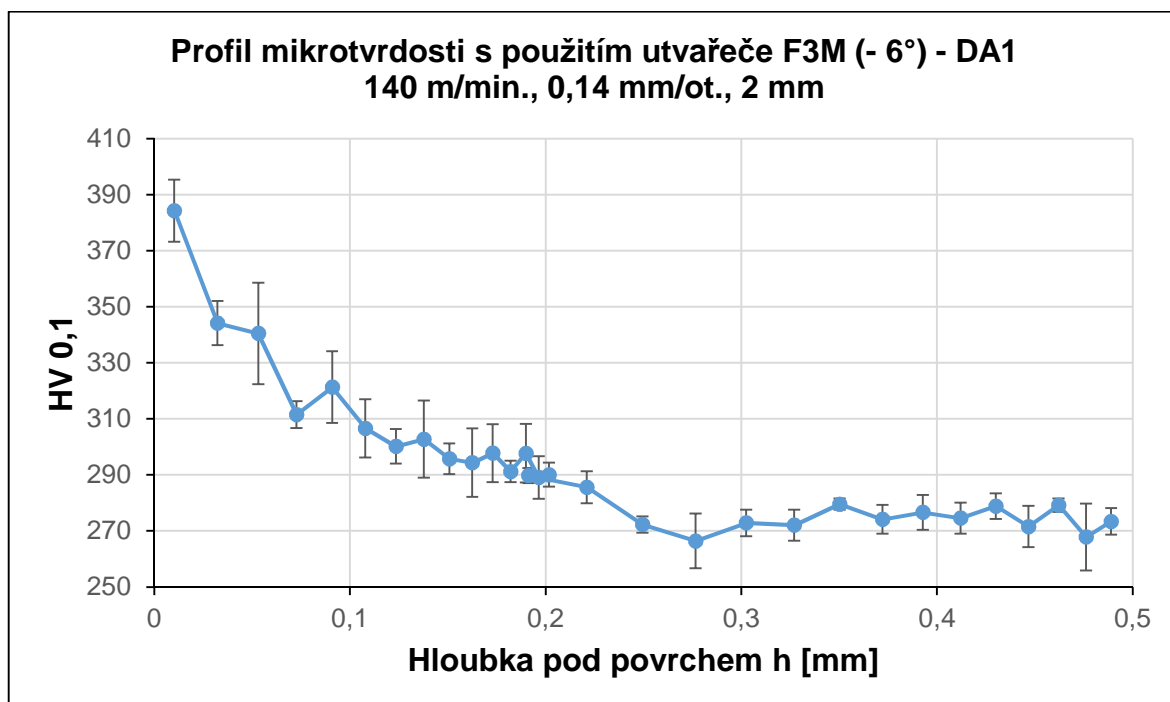
Příloha P1: Graf mikrotvrdosti včetně chybových úseček vzorku DA1, DA2

Příloha P2: Rentgenografická difrakční fázová analýza austenitické oceli
AISI 304 (EN 1.4301)

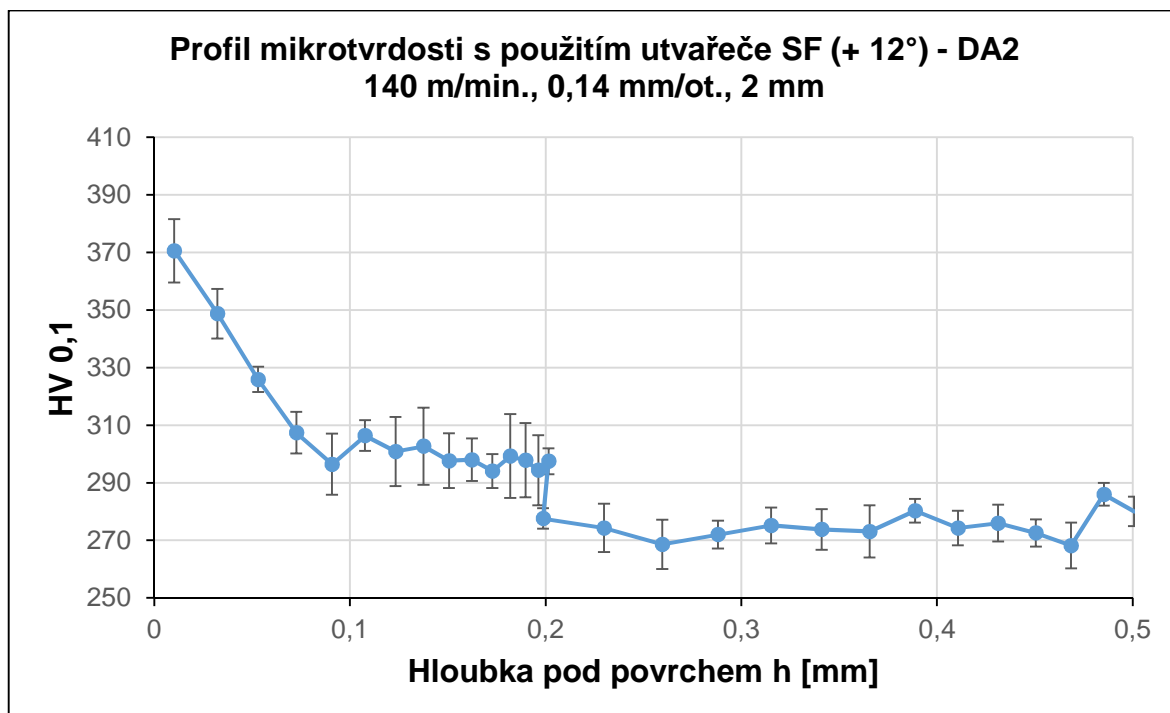
Příloha P3: Porovnání gradientů makroskopických zbytkových napětí
stanovených rentgenovou difrakční a odvrtávací metodou ve směru T

Příloha P4: Porovnání gradientů makroskopických zbytkových napětí
stanovených rentgenovou difrakční a odvrtávací metodou ve směru A

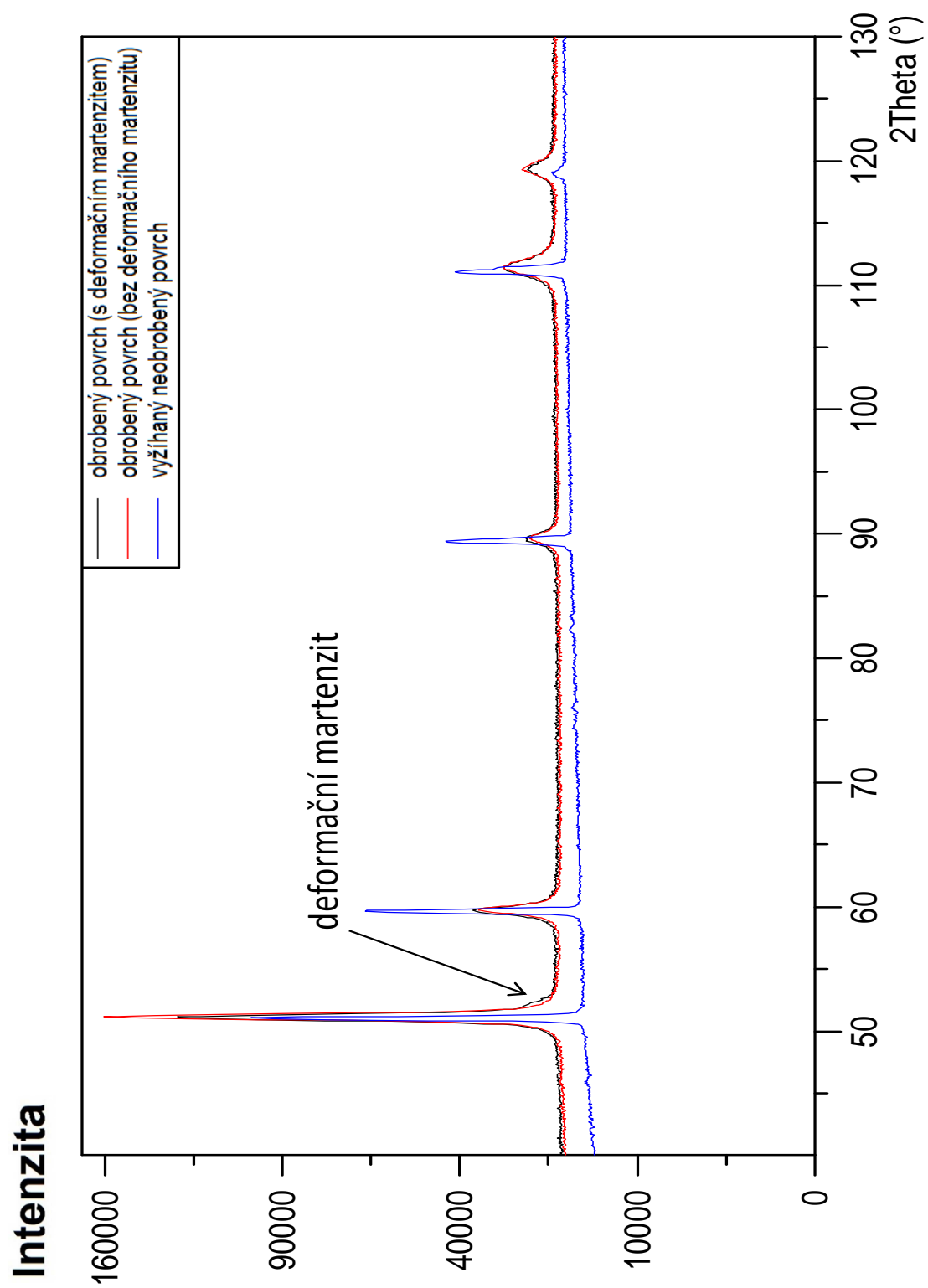
Příloha P1: Graf mikrotvrdosti včetně chybových úseček vzorku DA1



Příloha P1: Graf mikrotvrdosti včetně chybových úseček vzorku DA2

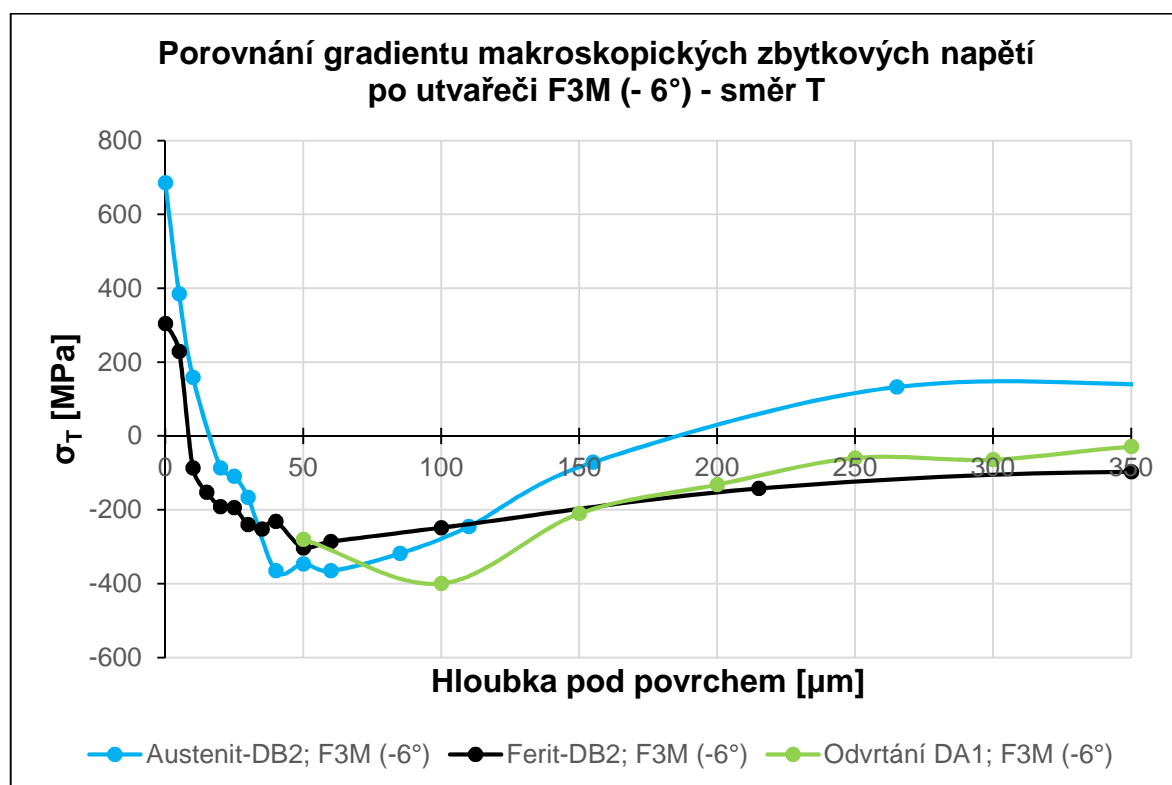
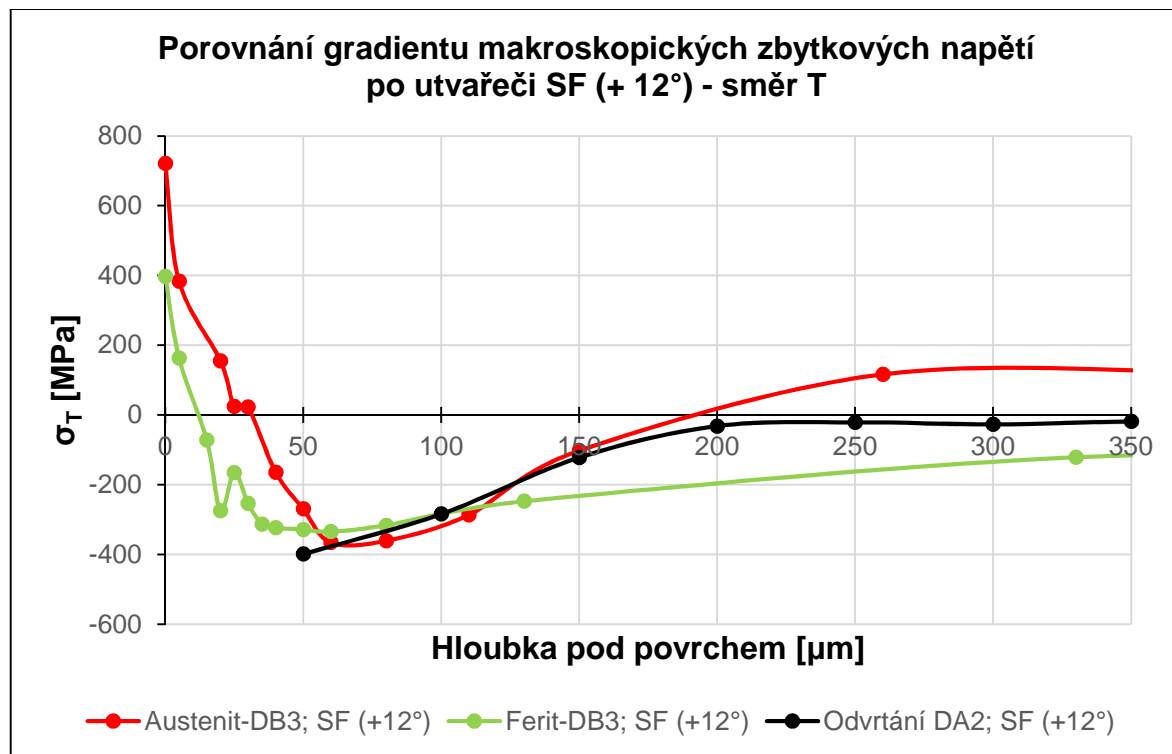


Příloha P2: Rentgenografická difrakční fázová analýza austenitické oceli
AISI 304 (EN 1.4301)



Příloha P3: Porovnání gradientů makroskopických zbytkových napětí
stanovených rentgenovou difrakční a odvrtávací metodou ve směru T

AISI 318 LN (EN 1.4462) - duplexní ocel



Příloha P4: Porovnání gradientů makroskopických zbytkových napětí
stanovených rentgenovou difrakční a odvrtávací metodou ve směru A

